Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 37, 2, 2025. (49-72)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Fixing the Defects of Burn mark and Short shot by Reducing the Clamping Force in the Production Process of Bushing 63 by Numerical and Statistical Methods*

Research Article

Ali Jafarzadeh[1], Ghasem Azamirad[2], Roya Soltani[3] , Alireza Mollaei[4]

10.22067/jacsm.2024.88357.1264

Abstract

The plastic injection process is useful for the mass production of complex parts due to its low cost and high efficiency. In this process, burn mark and short shot in the produced part are the first effective factors in rejecting or accepting it from the operator's point of view. In this research, bushing 63 piece made of UPVC has been investigated. Validated simulation is a low-cost alternative to experimentally performing the process to determine optimal values. Process parameters that can be changed on the injection machine are considered as input parameters. From the data screening method, the parameters affecting the process are identified. By the response surface method and variance analysis, respectively, to fix the considered defects with the minimum amount of clamping force required. Finally, the predicted output values from the CCD method, when compared with the simulation results, showed an average error of 6.03%, and as a result, it confirms the accuracy of the conducted research.

Keywords: Simulation of plastic injection process, Burn mark defect, Short shot defect, Clamping force, Statistical analysis.

1- Introduction

Injection molding is a suitable and widely used method to produce polymer parts, constituting 32% of plastic part production. Several notable advantages of plastic products over metals are high corrosion resistance, high strength-to-weight ratio, and ease of processing [1]. Clamping force is one of the key factors influencing the selection of an injection molding machine, as it is necessary to prevent two halves of the mold from closing and withstand pressure during injection. A lower clamping force results in higher productivity and lower cost. The tie bars of the structure are deformed elastically to generate this force [2].

Elimination of various defects in the manufactured part, such as warpage, low weld line strength, and sink marks, is necessary to increase efficiency and maintain consistent product quality. However, the most common defects in UPVC fittings are short shot and burn mark defects. Evaluating these defects in the injection molding process is complex. Within the authors' search scope, no research was found that simultaneously examined these three influential outputs on production efficiency. Improper adjustment of input parameters on the injection machine can easily lead to the emergence of these defects in the process [3, 4].

The aim of this article is to find the values of process parameters to eliminate short shot and burn mark defects while minimizing the clamping force with Moldflow software simulation and statistical analysis. The problem inputs consist of six process parameters that can be adjusted on the injection machine: melt temperature, cooling time, packing time, holding pressure, injection pressure, and injection time. The value of the last heating element at the injection nozzle tip is the melt temperature. The problem outputs are maximum mold clamping force, short shot defect, and maximum melt flow front temperature inside the mold.

These defects were first found in the workshop and simulated using Moldflow software to see if the intended defects were also present. Therefore, the simulation model was validated and accurate. Using a validated simulation as the first step in the optimization process eliminates the need for trial and error to find optimal input parameter values through experimental processes. A design of experiment using the Plackett-Burman method was

*Manuscript received June 2, 2024. Revised September 3, 2024, Accepted October 23, 2024.

[1] Master Student, Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

[2] Corresponding author, Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.
Email: azamirad@yazd.ac.ir

[3] Senior Quality Control Specialist, Yazd Poolica Industrial Co., Yazd, Iran.

[4] Department of Civil and Mechanical Engineering, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, Denmark.

subsequently conducted to determine the effect of input parameters on the output. After identifying the significant factors, a response surface method (RSM) based on the central composite design (CCD) type was carried out. Subsequently, polynomial equations for each response were derived using the Analysis of Variance (ANOVA) method. Finally, a simulation with optimal input values was conducted to evaluate the accuracy of the employed method, demonstrating appropriate and acceptable results.

2- Finite Element Method

The part under examination is a 63 mm bushing made of UPVC. Fig. 1 shows the part modeled using SolidWorks software. Experimental tests were conducted using an injection machine with a 220-ton clamping force. The plastic injection process for the part with a two-cavity mold was simulated using Moldflow software. The UPVC material used within the software was selected with the trade name Benvic IR705. The overall mesh size and mesh around the gate were set to 4.5 mm and 2 mm, respectively. The process simulation type within the software was selected as Cool+Fill+Pack. The mold material in the experimental process is DIN 1.2312, for which the equivalent P20 tool steel was selected in the software. Water at 25°C was considered as the mold cooling fluid at its inlet. In the experimental injection process, the clamping force is typically set to the maximum possible value on the machine. Experimental and simulation results indicate that a melt flow front temperature above 202°C inside the mold causes polymer burning. Figures 2 and 3 show the simulation and experimental results of the first and second tests, demonstrating similar outcomes and thus confirming the accuracy of the simulation model for the intended defects.



Fig. 1: Three-dimensional model of the 63 mm bushing

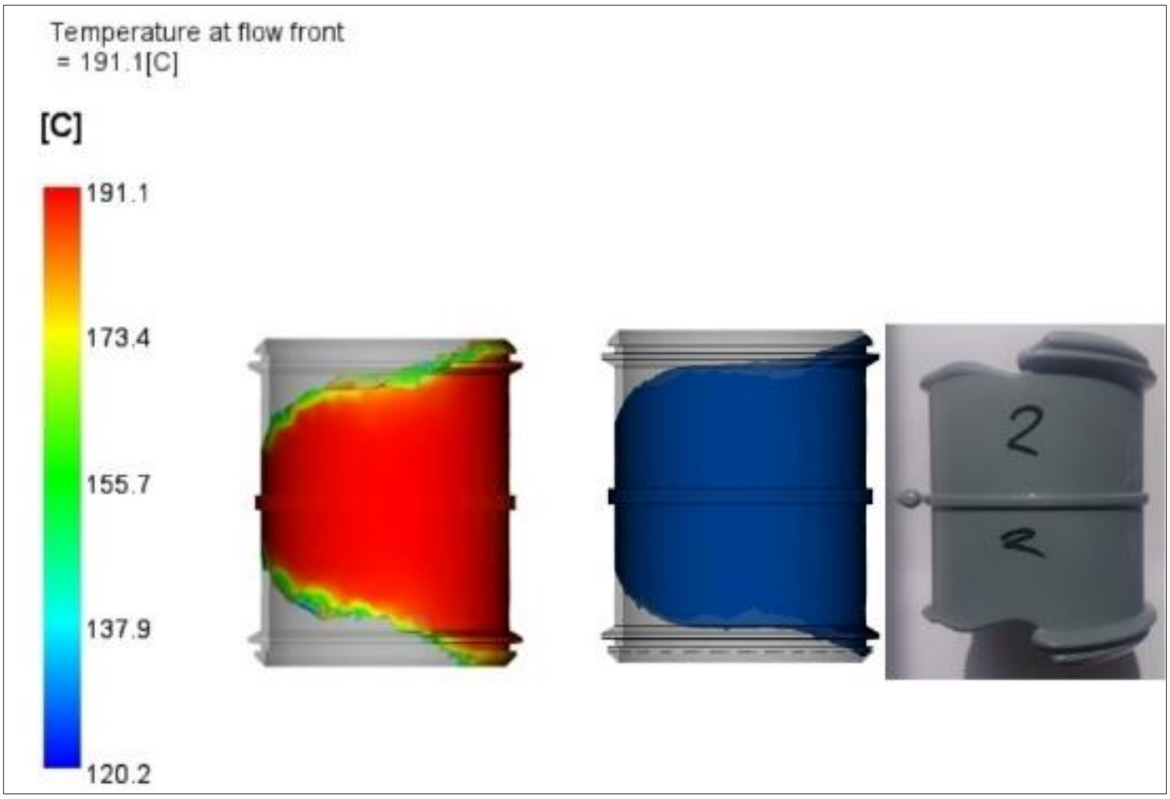


Fig. 2: Short shot defect in Experiment 1



Fig. 3: Burn mark defect in Experiment 2

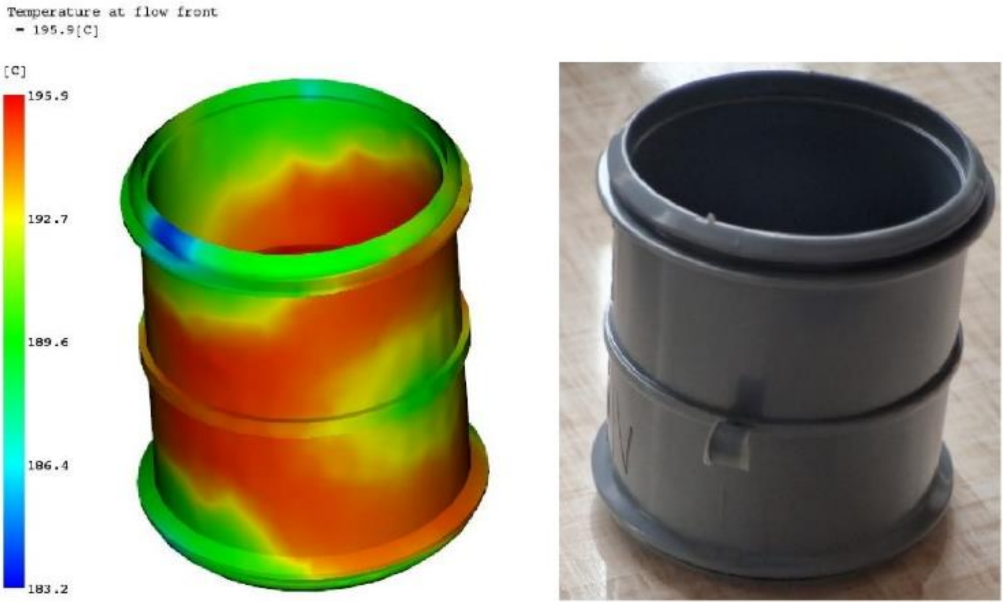


Fig. 4: Defect-free part Conclusion

3- Statistical Analysis

In this research initially conducted a two-level experimental design using the Plackett-Burman method with a 1/2 ratio to identify the significant parameters among the six input parameters. Consequently, 36 experiments were specified for simulation. The parameter ranges are presented in Table 1. After identifying the significant parameters, one insignificant factor was determined. For a more in-depth examination of the significant parameters, an experimental design using the response surface method of the central composite design type was performed with 32 experiments and an alpha value of 2.828. The value of the insignificant factor, holding pressure, was considered constant at 64.7.

Table 1: Input parameter ranges in design of experiment

Parameter	Lower limit	Upper limit
A	191.2	194.8
B	19.85	25.15
C	4.56	8.44
D	64.70	75.30
E	126.46	133.54
F	7.3	8.7

4- Optimization

The optimal input values were determined as follows: melt temperature 188.0 (°C), cooling cycle time 29.99 (seconds), packing time 1.01 (seconds), holding pressure 64.70 (MPa), injection pressure 127.47 (MPa), and injection time 6.15 (seconds). The optimal output values, including complete mold filling, were predicted with a clamping force of 128 (tons) and a maximum melt flow front temperature of 194.6 (°C). A simulation was finally performed using the optimal values obtained from the statistical analysis, with an average error of 6.03% compared to the output values predicted from the statistical analysis. The optimal results of the statistical analysis are shown in Fig. 4 in simulated and experimental forms, which are identical.

5- Conclusion

The results of this research can be summarized as follows:

1- As injection pressure increases, a higher clamping force is required, while low injection pressure leads to short-shot defects. With increased injection pressure, material viscosity decreases, consequently reducing the feasibility of short-shot defects.
2- Excessive clamping force results in poor air ventilation and short shot defects; this finding is consistent with the results of study [1].
3- Increasing melt temperature and injection time raises the probability of burn mark defect.
4- By identifying the critical point of polymer degradation during mold injection using the finite element method, this study eliminates the need for experimental procedures—unlike previous studies [2-4], which relied on empirical approaches to investigate and resolve such defects..

References

[1] M.-S. Huang and C.-Y. Lin, “A novel clamping force searching method based on sensing tie-bar elongation for injection molding,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 109, pp. 223–230, 2017. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.02.004

[2] S. Beheshtian Mesgaran, F. Elhami Nik, and S. E. Seyyed Mousavi, “Experimental and Numerical Analysis of Burn Marks and Shrinkage Effect on Injection Molding,” *in International Manufacturing Science and Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers,* 2017, p. V001T02A038-V001T02A038. https://doi.org/10.1115/MSEC2017-3009

[3] Y. Fukushima, T. Suzuki, K. Onda, H. Komatsu, H. Kuroiwa, and T. Kaburagi, “Study on the online monitoring of burn marks by gas sensor,” *International Journal of Automation Technology*, vol. 11, no. 1, pp. 112–119, 2017, https://doi.org/10.20965/ijat.2017.p0112

[4] J. Li et al., “Reducing the burn marks on injection-molded parts by external gas-assisted injection molding,” *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 23, pp. 1–10, 2021, doi: 10.3390/polym13234087.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

دانشگاه فردوسی مشهد

رفع عیوب سوختگی و پر نشدن قالب با کاهش نیروی گیره‌بندی در فرایند تولید بوشن ۶۳ به روش عددی و آماری*

مقاله پژوهشی

علی جعفرزاده(۱) قاسم اعظمی‌راد(۲) رؤیا سلطانی(۳) علیرضا مولایی(۴)

doi 10.22067/jacsm.2024.88357.1264

چکیده *فرایند تزریق پلاستیک به دلیل هزینه کم و کارایی بالا برای تولید انبوه قطعات پیچیده کاربردی است. در این فرایند، عیوب سوختگی و پر نشدن قالب در قطعه تولیدشده، اولین عامل اثرگذار در رد شدن یا قبول آن از نظر اپراتور است. در این پژوهش، قطعه بوشن ۶۳ از جنس یوپی‌وی‌سی، مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه‌سازی صحت‌سنجی شده، رویکردی کم‌هزینه و جایگزین انجام تجربی فرایند برای تعیین مقادیر بهینه است. پارامترهای فرایندی قابل‌تغییر بر روی دستگاه تزریق به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شد. از روش غربالگری داده، پارامترهای مؤثر بر فرایند شناسایی شد. سپس از روش سطح پاسخ و تحلیل واریانس به ترتیب معادله رگرسیون دقیق‌تر برای پاسخ‌ها و مقادیر بهینه پارامترهای ورودی برای رفع عیوب مد نظر با کمترین مقدار نیروی گیره‌بندی مورد نیاز به دست آمده است. در نهایت مشخص شد، مقادیر خروجی پیش‌بینی شده به روش طراحی مرکب مرکزی، میانگین خطای ٪۶/۰۳ با نتایج شبیه‌سازی دارند و در نتیجه، دقت پژوهش انجام شده را تأیید می‌کند.*

واژه‌های کلیدی شبیه‌سازی فرایند تزریق پلاستیک، عیب سوختن، عیب پر نشدن قالب، نیروی گیره‌بندی، تحلیل آماری.

مقدمه

قالب‌گیری تزریقی، روشی مناسب و پرکاربرد برای تولید قطعات پلیمری است به طوری که ٪۳۲ از تولید قطعات پلاستیکی را به خود اختصاص داده است. محصولات پلاستیکی چندین مزیت قابل توجه مانند مقاومت بالا در برابر خوردگی، نسبت استحکام به وزن بالا و فرایندپذیری آسان‌تر در برابر فلزات دارند. در فرایند تزریق پلاستیک مطابق با شکل (۱)، ابتدا مواد پلیمری به شکل گرانول در سیلندر (Barrel) مجهز به المنت‌های حرارتی ریخته می‌شوند تا گرم شده و به دمای مذاب برسند. سپس، گرانول‌ها به دلیل سایش با یکدیگر و تماس با سیلندر و ماردون به شکل خمیری درآمده و دمای آن‌ها بالا می‌رود. مواد با حرکت چرخشی ماردون (Screw) مخلوط می‌شوند و به سمت جلوی سیلندر پیش می‌روند و سپس مواد با نیروی ماردون به داخل قالب تزریق می‌شوند. پس از زمان سیکل خنک‌کاری، قالب باز شده و به کمک پین‌های پران، قطعه از قالب جدا می‌شود [1]. یکی از عوامل اساسی در انتخاب دستگاه ماشین تزریق، مقدار نیروی گیره‌بندی است و وظیفه آن بسته نگه‌داشتن دو نیمه قالب و تحمل فشار هنگام تزریق است و کم بودن آن منجر به بهره‌وری بالا و کاهش هزینه می‌شود. همان طور که در (شکل ۲) نشان داده شده است، از نقاط A تا B نشان‌دهنده مرحله آماده‌سازی است که در آن قسمت‌های قالب توسط واحد گیره‌بندی بسته می‌شوند و بستن نیمه‌های قالب باعث افزایش نیروی گیره‌بندی می‌شود و این مرحله در نقطه D تکمیل می‌شود [2]. پس از آن، مراحل پرکردن و نگهداری (Packing) قالب شروع می‌شود. نیروی گیره‌بندی با توجه به مدت زمان تزریق به مقدار حداکثر خود نزدیک می‌شود و نقطه اوج آن به دلیل رسیدن فشار تزریق به حداکثر

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۳/۱۳ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۸/۵ می‌باشد.

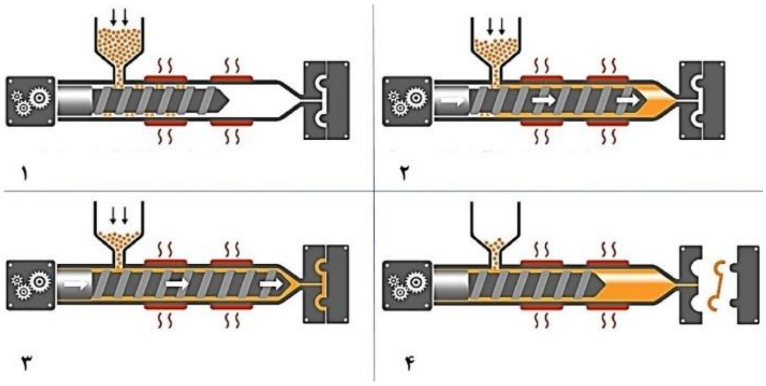
(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد.
(۲) نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد.
(۳) کارشناس ارشد بخش کنترل کیفیت و آزمایشگاه، شرکت تولیدی صنایع یزد پولیکا.
(۴) دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی دانمارک، کپنهاگ، دانمارک.

Email: azamirad@yazd.ac.ir

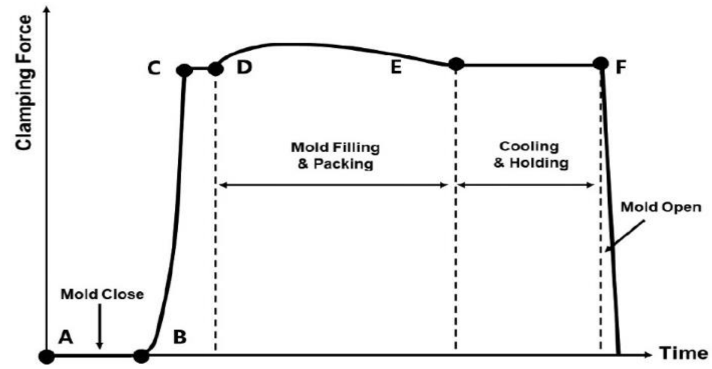
مقدار تنظیم شده بر روی دستگاه است. سپس مرحله نگهداری تا زمان منجمد شدن دریچه برای جبران انقباض ادامه می‌یابد و دیگر مذاب به داخل حفره قالب جریان پیدا نمی‌کند. در نقطه E، مذاب جامد شده و نیروی گیره‌بندی به پایداری می‌رسد و در نهایت نقطه F، اتمام مرحله خنک‌کاری و نگهداری را نشان می‌دهد [3,4]. شکل (۳) نشان می‌دهد که این نیرو از تغییر شکل الاستیک میله‌های مهار (Tie bars) ایجاد می‌شود [5]. برای افزایش کارایی و داشتن کیفیت محصول ثابت، حذف عیوب مختلف در قطعه تولیدی مانند تاب برداشتن (Warpage)، استحکام پایین خط جوش (Weldine) و علائم فرورفتگی موضعی (Sink marks) حائز اهمیت است، اما عیوب پر نشدن قالب (Short Shot) و سوختن (Burn mark)، متداول‌ترین عیوب در اتصالات از جنس یوپی‌وی‌سی هستند. ارزیابی این عیوب در فرایند قالب‌گیری تزریقی بسیار پیچیده است و عیب سوختن در تولید قطعات جدار نازک بیشتر اتفاق می‌افتد [6,7].

محققان با استفاده از نوآوری‌های مختلف در بهینه‌سازی مقادیر یا تغییر طراحی قالب در فرایند تزریق پلاستیک تلاش کرده‌اند تا کیفیت قطعات تولیدی را افزایش دهند. مولایی و همکاران، میزان تأثیر پارامترهای مختلف در بروز عیب پاشش جریان را با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری بررسی کردند [9]. حسن و همکارانش، تحقیقی درباره تأثیر سیستم خنک‌کننده بر نرخ انقباض (Shrinkage) قطعه‌ای از جنس پلی‌استایرن در طی فرایند تزریق پلاستیک انجام دادند و متوجه شدند، کانال‌های خنک‌کننده تأثیر زیادی بر دمای نهایی و توزیع نرخ انقباض قطعات دارند [10]. یوآنگ (Hwang) و همکارانش با استفاده از فرایند تزریق پلاستیک میکروسلولی، تأثیر پارامترهای مختلف بر روی انقباض یک چرخ‌دنده را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد، تزریق پلاستیک میکروسلولی باعث تغییر ضخامت و مقدار انقباض کمتر نسبت به تزریق پلاستیک معمولی می‌شود [11]. بهشتیان و الهامی، تأثیر قالب بر عیوب سوختن و انقباض قطعه را بررسی کرده و با اصلاح قالب به کمک قرار دادن پین بیرون‌انداز در محل مناسب، باعث کاهش عیب مورد نظر شدند [7]. یین (Yin) و همکاران، عیب تاب‌برداشتن (Warpage) را به کمک مدل شبکه عصبی پس انتشار (Back propagation) و پارامترهای فرایند شامل دمای قالب، دمای مذاب، فشار نگهداری، زمان فشار نگهداری و زمان سیکل خنک‌کاری، سنجیدند [12].

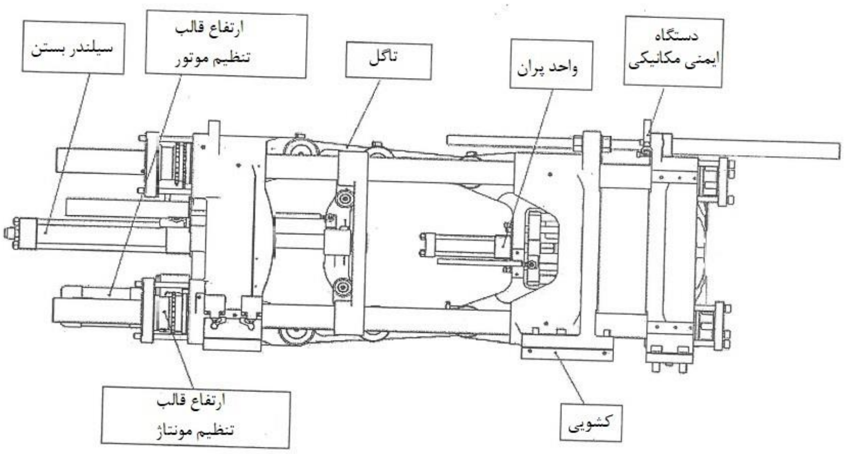
وی ـ جی (Wei-Jie) و پنگ (Peng) مطرح کردند که تنظیم نادرست نیروی گیره‌بندی منجر به کیفیت پایین قطعه و کوتاه‌تر شدن طول عمر دستگاه می‌شود [4]. کیتایاما (Kitayama) و ناتسومه (Natsume)، نتیجه گرفتند که نیروی گیره‌بندی ناکافی باعث ایجاد عیب پلیسه می‌شود و منجر به آسیب دائمی به قالب و وزن غیریکسان محصول‌ها می‌گردد [13] و همچنین تنظیم بیش از حد نیروی گیره‌بندی منجر به عیوبی از جمله سوختگی، پر نشدن قالب و تهویه ضعیف هوا می‌شود [3]. وایبووو (Wibowo) و همکاران، عیب پر نشدن قالب در تولید روکش رادیاتور را بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار مولدفلو (Moldflow) متوجه شدند که دلیل این عیب، عدم پر شدن همزمان دو حفره است. با تجزیه و تحلیل ابعاد سیستم راهگاهی، این عیب را برطرف کردند [14]. ماهاجان (Mahajan) و اوله (Ulhe) عیب پر نشدن قالب در قطعه‌ای از جنس سی‌پی‌وی‌سی (CPVC) را بررسی کردند. مقادیر بهینه پارامترهای بهینه تزریق را با استفاده از روش تاگوچی (Taguchi) برای به حداقل رساندن عیب پر نشدن قالب تعیین کردند. با توجه به نتایج آن‌ها، پارامتر سرعت بسته شدن قالب، بیشترین تأثیر را بر ویژگی کیفی قطعه تولیدی داشت [15]. جان (Jan) و همکاران، تأثیر عوامل مختلف بر قطعات ساخته شده از جنس پلی‌پروپیلن و پلی‌استایرن را با روش تاگوچی بررسی کردند و متوجه شدند که دما مهم‌ترین عامل برای به حداقل‌رساندن انقباض است [16]. ایزدی و مصدق اثر تغییر دمای قالب در نمونه‌ای از جنس پلی‌آمید ۶ را بررسی کردند و اعوجاج نمونه را به کمک مدل کلی ماکسول (Generalized Maxwell Model) و شبیه‌سازی پیش‌بینی کردند [17]. معاونیان و همکاران، به بررسی فرایند تزریق در تولید لوله‌های سانتریفیوژ از جنس پلی‌لاکتیک‌اسید به جای پلی‌پروپلین پرداختند [18]. آخوندی و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی و تجربی، اثر ابعاد دریچه، فشار نگهداری و زمان فشار نگهداری را بر روی میزان انقباض قطعه‌ای از جنس پلی‌اکسی‌متیلن (Polyoxymethylene) بررسی کردند [19]. ابوالحسنی‌فر و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی، تأثیر جنس قالب بر اعوجاج قطعه کاربردی در فیزیوتراپی را بررسی کردند [20]. در فرایند تجربی تزریق می‌توان دریافت، مقدار نامناسب پارامترهای فرایندی منجر به عیب پر نشدن قالب می‌شود و به ندرت در تحقیق‌های گذشته مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱ مراحل تزریق پلاستیک [8]



شکل ۲ تغییر نیروی گیره‌بندی در فرایند تزریق [2]



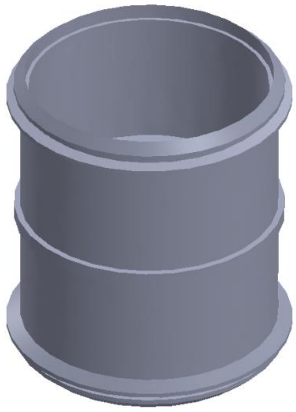
شکل ۳ واحد بستن قالب از نوع تاگل (Toggle)

هدف اصلی این پژوهش، پیش‌بینی و رفع عیوب سوختگی و پر نشدن قالب با کاهش نیروی گیره‌بندی برای تولید قطعه پلاستیکی است و در محدوده جستجوی مؤلفان تحقیقی یافت نشد که این سه خروجی تأثیرگذار در بازدهی تولید به صورت همزمان مورد بررسی قرار گرفته باشند. تنظیم نادرست پارامترهای ورودی بر روی دستگاه تزریق به راحتی منجر به پیدایش این عیوب در فرایند می‌شوند و رفع این عیوب، باعث افزایش کارایی فرایند و بهبود کیفیت محصول خواهد شد؛ لذا در این تحقیق مقدار پارامترهای فرایندی بهینه برای رسیدن به قطعه بدون عیب با کمترین نیروی گیره‌بندی لازم تعیین شدند. ابتدا

این عیوب در کارگاه شناسایی و به وسیله نرم‌افزار مولدفلو، فرایند شبیه‌سازی گردید و عیوب مد نظر در نرم‌افزار نیز مشاهده شد. در نتیجه اعتبار و صحت مدل شبیه‌سازی تأیید شد. مزیت استفاده از شبیه‌سازی صحت‌سنجی شده به عنوان گام اول فرایند بهینه‌سازی، نیاز به آزمون و خطا برای رسیدن به مقادیر بهینه پارامترهای ورودی به وسیله فرایند تجربی را برطرف می‌کند. سپس برای مشخص کردن میزان تأثیر پارامترهای ورودی بر خروجی، طراحی آزمایشی به روش پلاکت ـ برمن (Plackett-Burman) انجام شد. پس از مشخص شدن عامل‌های مؤثر، طراحی آزمایشی به روش سطح پاسخ (RSM) از نوع طراحی مرکب مرکزی (CCD) انجام شد. در ادامه برای هر پاسخ، معادلات چند جمله‌ای از روش تحلیل واریانس (ANOVA) به دست آمد. در نهایت برای سنجش دقت روش به کار گرفته شده، شبیه‌سازی با مقادیر بهینه ورودی انجام شد که نشان‌دهنده نتایج مناسب و قابل قبول است.

بیان مسئله و ذکر اهداف

قطعه مورد بررسی در این مطالعه، بوشن ۶۳ از جنس یوپی‌وی‌سی است که از طریق فرایند تزریق پلاستیک ساخته می‌شود. این قطعه کاربردی در صنعت تأسیسات و ساختمان است. شکل (۴) قطعه مدل‌سازی شده به کمک نرم‌افزار سالیدروکس (Solidworks) را نشان می‌دهد. آزمایش‌های تجربی به وسیله دستگاه تزریق با نیروی گیره‌بندی ۲۲۰ تن انجام شده است. مشخصات فنی دستگاه در جدول (۱) ذکر شده است. هدف از این مقاله، پیدا کردن مقادیر بهینه پارامترهای فرایندی برای حذف عیوب پر نشدن قالب و سوختگی قطعه با کاهش نیروی گیره‌بندی مورد نیاز به کمک شبیه‌سازی در نرم‌افزار مولدفلو و تحلیل آماری است. ورودی مسئله، شش پارامتر فرایندی شامل دمای مذاب، مدت زمان تزریق، مدت زمان فشار نگهداری، مدت زمان خنک‌کاری، فشار تزریق و فشار نگهداری است که قابل تنظیم بر روی دستگاه تزریق هستند. دمای مذاب، مقدار آخرین المنت حرارتی سر نوک نازل تزریق است. خروجی مسئله، حداکثر نیروی گیره‌بندی قالب، عیب پر نشدن قالب و حداکثر دمای جبهه جریان مذاب در داخل قالب است که به ترتیب با پارامترهای G، H و I در متن پژوهش بیان شده‌اند.



شکل ۴ مدل سه‌بعدی قطعه بوشن ۶۳

جدول ۱ مشخصات ماشین تزریق

پارامتر	مقدار
حداکثر نیروی گیره‌بندی (ton)	۲۲۰
کورس ماردون (mm)	۲۳۵
حداکثر سرعت چرخشی ماردون (rpm)	۱۷۱
قطر ماردون (mm)	۵۲
حداکثر ظرفیت قیف (L)	۸۲
ابعاد ماشین (m)	۵/۳x۱/۵x۲/۱

شبیه‌سازی

فرایند تزریق پلاستیک قطعه با قالب دو حفره‌ای به کمک نرم‌افزار مولدفلو شبیه‌سازی شد. در داخل نرم‌افزار جنس یوپی‌وی‌سی مورد استفاده با نام تجاری بنویک ـ ای ـ آر ۷۰۵ (Benvic IR705)، به دلیل نزدیک بودن مقدار چگالی جامد و دمای مذاب پیشنهادی تأمین‌کننده آن به ماده تجربی، انتخاب گردید که مشخصات آن در جدول (۲) آورده شده است. برای اعتبارسنجی و استقلال مش مدل، شبیه‌سازی آزمایش تجربی دوم که در بخش صحت‌سنجی بیان شده است، ابتدا با مش از نوع سه‌بعدی درشت سپس با ابعاد ریزتر انجام شد. خلاصه نتایج اعتبارسنجی مش مدل در جدول (۳) و قطعه مش‌بندی شده در شکل (۵) آورده شده است، بنابراین اندازه مش کلی و مش اطراف دریچه به ترتیب برابر ۴/۵ و ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. نوع شبیه‌سازی فرایند داخل نرم‌افزار از نوع Cool+Fill+Pack انتخاب گردید. جنس قالب در فرایند تجربی از جنس DIN 1.2312 می‌باشد که معادل آن داخل نرم‌افزار از نوع فولاد ابزار P20 انتخاب شد. آب با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به منظور سیال خنک‌کار قالب در

ورودی آن لحاظ گردید.

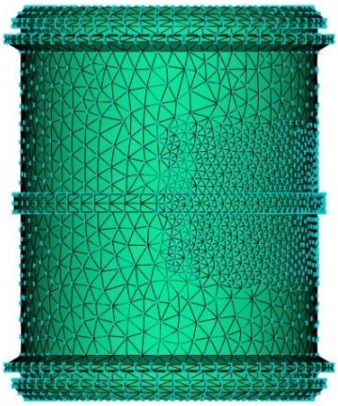
ابعاد سیستم راهگاهی در جدول (۴) بیان شده است. شکل (۶)، قالب دوحفره‌ای آزمون تجربی به همراه مسیر خنک‌کاری و سنبه آن را نشان می‌دهد و شکل (۷)، مدل شبیه‌سازی شده تجربی در نرم‌افزار مولدفلو است.

جدول ۲ مشخصات ماده بنویک ـ آی ـ آر ۷۰۵

خواص ماده	مقدار
چگالی جامد (g/cm^3)	۱/۴۳
چگالی مذاب (g/cm^3)	۱/۳۲
حداقل دمای مذاب پیشنهاد شده (°C)	۱۶۰
حداکثر دمای مذاب پیشنهاد شده (°C)	۲۰۰
دمای گذار (°C)	۱۲۰
ضریب حرارت ویژه در دمای ۱۸۰ درجه (J/kg°C)	۱۷۶۷
رسانایی گرمای در دمای ۱۸۰ درجه (W/m°C)	۰/۱۳
مدول الاستیک (MPa)	۳۲۸۰
مدول برشی (MPa)	۱۱۶۰
نسبت پوآسون	۰/۴۲

جدول ۳ ابعاد مش

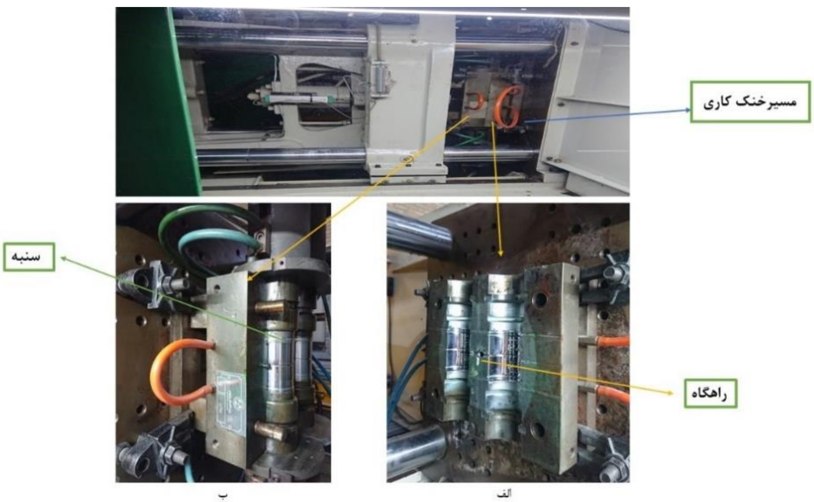
ابعاد مش		حداکثر دمای جبهه جریان مذاب (°C)	پرشدن کامل قالب
کلی (mm)	اطراف دریچه (mm)		
۶	۲	۱۹۸/۲	خیر
۵/۵	۲	۱۹۹/۳	خیر
۵	۲	۱۹۸/۶	بله
۴/۵	۲	۲۰۲/۸	بله
۴	۲	۲۰۲/۹	بله



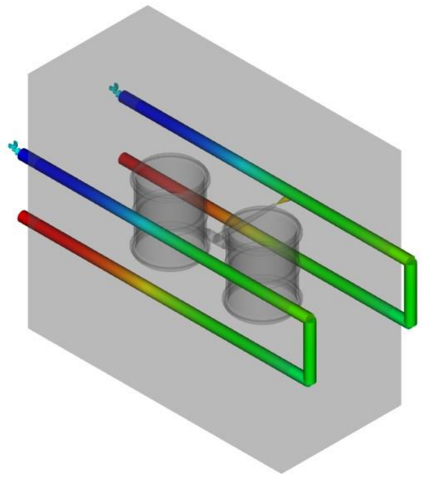
شکل ۵ قطعه مش‌بندی شده

جدول ۴ ابعاد سیستم راهگاهی

اجزا	نوع	تعداد	طول (mm)	قطر شروع	زاویه (deg)
اسپرو (Sprue)	دایروی	۲	۱۲	۱۰	
راهگاه	مخروطی	۱	۷۶	۴	۱/۵
دریچه	مخروطی	۲	۱۲/۵	۳/۵	۱۴/۵



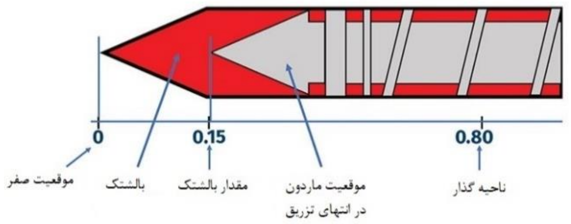
شکل ۶ قالب تجربی: الف) نیمه راست و ب) نیمه چپ



شکل ۷ مدل شبیه‌سازی شده با سیستم خنک‌کاری

دلایل تشکیل عیوب

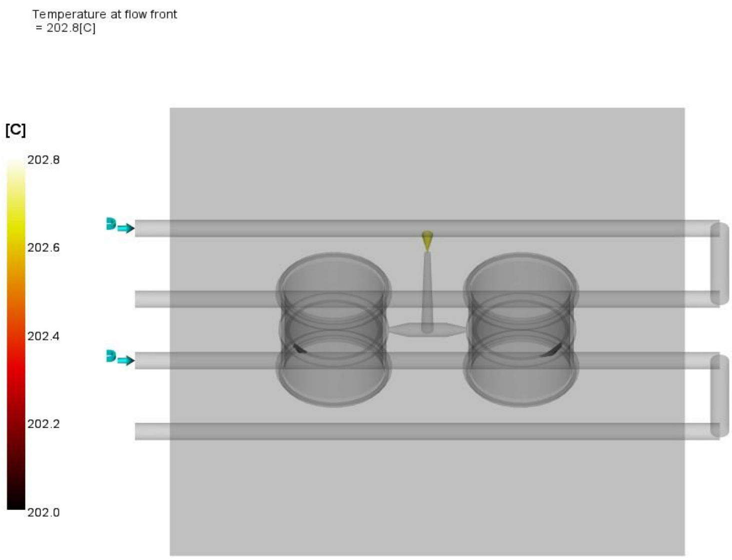
پلیمر پوپی‌وی‌سی هنگام حرارت دادن تولید گاز می‌کند و عدم تخلیه کامل این گاز می‌تواند باعث بروز لکه‌های قرمزرنگ روی قطعه شود که به عنوان عیب سوختگی نام برده می‌شود. دلایل بروز این عیب شامل دمای بالای جبهه جریان مذاب، تخلیه ناکافی گاز حاصل از حرارت دادن به پلیمر و هوای حبس شده در قالب است. حبس هوا را می‌توان از طریق الگوی پر شدن قالب پیش‌بینی کرد. زمانی که مذاب به داخل حفره تزریق می-شود، جریان سیال به صورت خطی است و اگر سرعت تزریق افزایش یابد، حالت جریان مغشوش می‌شود؛ بنابراین اگر سرعت یا فشار تزریق خیلی زیاد باشد، در مدت زمان اندک مرحله تزریق، هوای محبوس شده در سیستم راهگایی و حفره‌ها نمی‌تواند از مسیر کانال تهویه قالب به درستی خارج شود. در نتیجه، هوای به دام افتاده، فشرده می‌شود و فشار و دمای آن افزایش می‌یابد که منجر به سوختن مواد ترموپلاستیک می‌شود و پلیمر دچار از هم پاشیدگی (تخریب) می‌گردد [7]. در مقابل سرعت تزریق خیلی کم منجر به پر نشدن قالب می‌شود و علت این اتفاق با توجه به شکل (۸)، وجود بالشتک (Cushion) است. مواد باقی‌مانده در نوک ماردون، پس از مراحل پر کردن و نگهداری، بالشتک نامیده می‌شود. بالشتک برای فراهم کردن مواد کافی برای پر کردن کامل قالب حیاتی است و اگر مواد در آن ناحیه، در هنگام تزریق کافی نباشد، قطعاتی با جرم کم و شامل حفره تولید می‌شوند [21]. نیروی گیره‌بندی زیادی برای جلوگیری از جدا شدن قالب در حین پر کردن لازم است، با این حال با اعمال نیروی بیش از حد، عمر مفید قالب کاهش می‌یابد و سطوح قالب را لکه‌دار می‌کند و منجر به تخلیه ناکافی گاز و ایجاد عیوب سوختگی و پر نشدن قالب می‌شود. در مقابل، نیروی گیره‌بندی مناسب، مصرف انرژی را کاهش و راندمان تولید را بالا می‌برد [24–22].



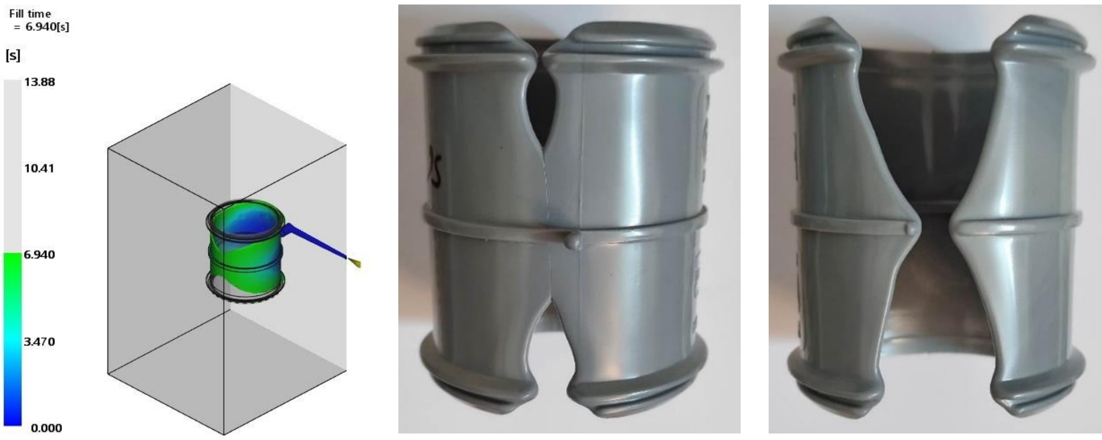
شکل ۸ بالشتک در فرایند تزریق

صحت‌سنجی

در فرایند تزریق تجربی، معمولا نیروی گیره‌بندی در حداکثر مقدار ممکن بر روی دستگاه تنظیم می‌شود. مدل شبیه‌سازی فرایند می‌تواند با نشان دادن عیوب مد نظر، صحت آن تأیید و حداکثر نیروی گیره‌بندی مورد نیاز تزریق از آن قابل استنتاج شود. نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان می‌دهند که دمای جبهه جریان مذاب بالای ۲۰۲ درجه سانتی‌گراد داخل قالب باعث سوختن پلیمر می‌شود. در نرم‌افزار با تنظیم محدوده جبهه جریان مذاب مطابق با شکل (۹) محل آثار سوختن و یا عدم سوختن در قطعه نهایی قابل مشاهده است. برای مشاهده مقدار حداکثر نیروی گیره‌بندی و پر شدن قالب از فایل گزارش (Log file) نرم‌افزار استفاده شد. از الگوی پر شدن قطعه نیز مطابق با شکل (۱۰)، محل ایجاد حبس هوا قابل پیش‌بینی است و حبس هوا، علت اصلی ایجاد عیوب سوختگی و پر نشدن قالب است. شکل (۱۰ـ الف) و شکل (۱۰ـ ب) چگونگی پر شدن قطعه به‌صورت تجربی را نشان می‌دهد که با شکل (۱۰ ـ ج) مطابقت دارد و در نتیجه صحت مدل شبیه‌سازی در چگونگی پر شدن مذاب در قالب نیز تأیید می‌گردد. مقدار پارامترهای ورودی، مقدار حداکثر نیروی گیره‌بندی مورد نیاز، داشتن و نداشتن عیب پر نشدن قالب و مقدار حداکثر دمای جبهه جریان مذاب برای آزمایش‌های تجربی ۱ و ۲، در جدول (۵) نشان داده شده است. برای پارامتر خروجی H، مقدار صفر و یک آن به ترتیب به معنای پر نشدن و پر شدن کامل قالب می‌باشد و حتی مقدار اندکی از پر نشدن قالب به عنوان عیب در نظر گرفته شده است. شکل (۱۱) و (۱۲) نشان دهنده نتایج شبیه‌سازی و تجربی آزمایش اول و دوم است و نتایج مشابهی را نشان می‌دهد و در نتیجه، صحت مدل شبیه‌سازی برای عیوب مد نظر تأیید می‌گردد.



شکل ۹ نمایی از محل سوختن قطعه در شبیه‌سازی نرم‌افزار

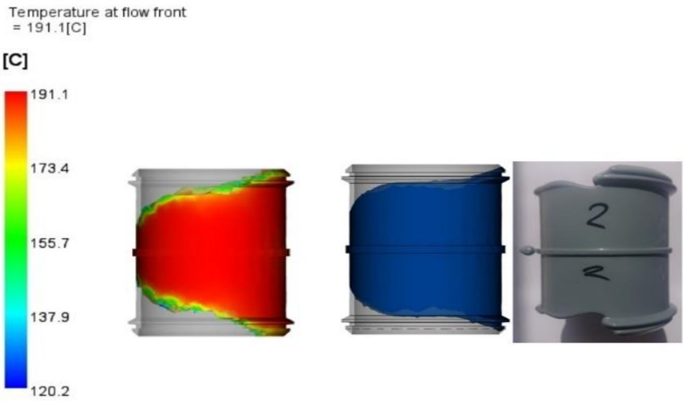


(الف) (ب) (ج)

شکل ۱۰ عیب پر نشدن قالب (الف و ب) نحوه پر شدن مذاب در قالب به صورت تجربی و (ج) الگوی پر شدن مذاب در شبیه‌سازی

جدول ۵ مقادیر پارامترهای آزمایش ۱ و ۲

عوامل	عنوان	پارامتر	آزمایش ۱	آزمایش ۲
			مقدار	مقدار
ورودی	A	دمای مذاب (°C)	۱۹۱/۲	۱۹۶
	B	مدت زمان سیکل خنک‌کاری (s)	۱۹/۷۵	۱۸/۶۴
	C	مدت زمان فشار نگهداری (s)	۸/۴۴	۶
	D	فشار نگهداری (MPa)	۶۴/۷۰	۶۴/۷۰
	E	فشار تزریق (MPa)	۱۲۶/۴۶	۱۱۵
	F	مدت زمان تزریق (s)	۹/۷	۷/۷
خروجی	G	حداکثر نیروی گیره‌بندی لازم (t)	۱۰۳	۱۲۲
	H	عیب پر نشدن قالب	بله	خیر
	I	حداکثر دمای جبهه جریان مذاب (°C)	۱۹۱/۱	۲۰۲/۸



شکل ۱۱ عیب پر نشدن قالب در آزمایش ۱



شکل ۱۲ عیب سوختگی در آزمایش ۲

طراحی آزمایش

در فرایند تزریق پلاستیک پارامترهای فرایندی زیادی بر کیفیت محصول نهایی تأثیرگذار است. درک و بیان صریح رابطه بین پارامترهای فرایندی برای به حداقل رساندن نیروی گیره‌بندی و رفع عیوب پر نشدن قالب و سوختگی دشوار است. در چنین شرایطی، طراحی آزمایش و بهینه‌سازی، یک رویکرد مفید است. طراحی آزمایش رویکردی علمی است که به محققان اجازه کسب دانشی برای کاهش زمان و هزینه انجام فرایند، فهم بهتر فرایند و میزان تأثیر ورودی‌ها بر روی خروجی‌ها را می‌دهد. این روش عمدتا عوامل کنترل و ویژگی‌های کیفی را با تعریف پیوندهایی بین ورودی و خروجی، ترکیب می‌کند. در این تحقیق ابتدا به کمک نرم‌افزار مینی‌تب (Minitab) برای شناسایی پارامترهای مؤثر از شش پارامتر ورودی، طراحی آزمایش دوسطحی به روش پلاکت ـ برمن (Plackett-Burman) و با نسبت ۱/۲ انجام شد.

در طراحی غربالگری برای هر ورودی سطوح بالا و پایین در نظر گرفته می‌شود که باید به صورت واقع‌بینانه تعیین شوند؛ بنابراین مقادیر سطوح غربالگری باید به گونه‌ای تعریف شوند که اگر همه عوامل مؤثر واقع شدند، انجام آزمایش تجربی در محدوده عوامل طراحی سطح پاسخ، امکان‌پذیر باشد. با توجه به ماده مورد نظر حد پایین و حد بالای دمای مذاب در غربالگری به ترتیب برابر ۱۹۱/۲ و ۱۹۴/۸ درجه سانتی‌گراد تعیین شد. با توجه به مشخصات دستگاه تزریق مقدار حد پایین و حد بالای فشار نگهداری و فشار تزریق مطابق جدول (۶) در نظر گرفته شد. به منظور تعیین مقادیر سطوح مدت زمان خنک‌کاری، نگهداری و تزریق از متخصصان شرکت «یزد اتصال پلیمر» کمک گرفته شد. نرم‌افزار، تعداد ۳۶ آزمایش را برای انجام شبیه‌سازی مشخص کرد. محدوده پارامترهای ورودی و نتایج تحلیل غربالگری به ترتیب در جدول (۶) و جدول (۷) آمده است.

جدول ۶ محدوده پارامترهای ورودی در طراحی آزمایش

پارامتر	حد پایین	حد بالا
A	۱۹۱/۲	۱۹۴/۸
B	۱۹/۸۵	۲۵/۱۵
C	۴/۵۶	۸/۴۴
D	۶۴/۷۰	۷۵/۳۰
E	۱۲۶/۴۶	۱۳۳/۵۴
F	۷/۳	۸/۷

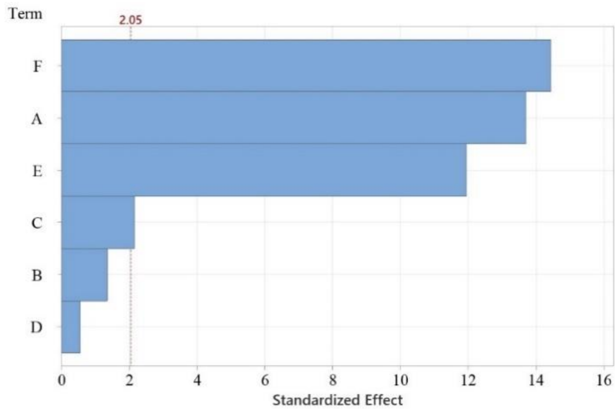
جدول ۷ نتایج طراحی آزمایش به روش پلاکت ـ برمن

اجرا	پارامترهای ورودی						پارامترهای خروجی		
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
۱	۱۹۴/۸	۱۹/۸۵	۴/۵۶	۶۴/۷۰	۱۳۳/۵۴	۸/۷	۱۷۹	۱	۲۰۷/۶
۲	۱۹۱/۲	۱۹/۸۵	۸/۴۵	۶۴/۷۰	۱۲۶/۴۶	۸/۷	۱۱۷	۰	۱۹۹/۳
۳	۱۹۱/۲	۱۹/۸۵	۴/۵۶	۷۵/۳۰	۱۲۶/۴۶	۷/۳	۱۴۶	۱	۱۹۸/۴
۴	۱۹۴/۸	۱۹/۸۵	۴/۵۶	۷۵/۳۰	۱۲۶/۴۶	۷/۳	۱۸۲	۰	۲۰۱/۵
۵	۱۹۴/۸	۱۹/۸۵	۸/۴۵	۶۴/۷۰	۱۲۶/۴۶	۷/۳	۱۷۰	۰	۲۰۱/۵
۶	۱۹۴/۸	۱۹/۸۵	۸/۴۵	۶۴/۷۰	۱۲۶/۴۶	۸/۷	۱۴۸	۰	۲۰۶/۵
۷	۱۹۴/۸	۲۵/۱۵	۴/۵۶	۶۴/۷۰	۱۲۶/۴۶	۸/۷	۱۴۴	۰	۲۰۱/۹
۸	۱۹۴/۸	۲۵/۱۵	۸/۴۵	۶۴/۷۰	۱۲۶/۴۶	۷/۳	۱۷۶	۰	۲۰۱/۵
۹	۱۹۴/۸	۲۵/۱۵	۴/۵۶	۷۵/۳۰	۱۳۳/۵۴	۸/۷	۱۶۵	۱	۲۰۱/۹
۱۰	۱۹۱/۸	۲۵/۱۵	۴/۵۶	۶۴/۷۰	۱۳۳/۵۴	۸/۷	۱۳۷	۰	۱۹۹/۰
۱۱	۱۹۱/۲	۱۹/۸۵	۴/۵۶	۶۴/۷۰	۱۲۶/۴۶	۷/۳	۱۴۵	۱	۱۹۸/۴
۱۲	۱۹۱/۲	۱۹/۸۵	۴/۵۶	۷۵/۳۰	۱۳۳/۵۴	۸/۷	۱۴۶	۰	۱۹۸/۵
۱۳	۱۹۴/۸	۱۹/۸۵	۴/۵۶	۷۵/۳۰	۱۳۳/۵۴	۸/۷	۱۷۹	۰	۲۰۷/۶
۱۴	۱۹۴/۸	۱۹/۸۵	۴/۵۶	۷۵/۳۰	۱۳۳/۵۴	۷/۳	۲۰۰	۰	۲۰۱/۵
۱۵	۱۹۴/۸	۲۵/۱۵	۴/۵۶	۷۵/۳۰	۱۲۶/۴۶	۸/۷	۱۴۴	۰	۲۰۱/۹
۱۶	۱۹۱/۲	۲۵/۱۵	۸/۴۵	۶۴/۷۰	۱۳۳/۵۴	۷/۳	۱۶۳	۱	۱۹۸/۲
۱۷	۱۹۱/۲	۲۵/۱۵	۴/۵۶	۶۴/۷۰	۱۳۳/۵۴	۷/۳	۱۸۹	۱	۱۹۸/۵
۱۸	۱۹۱/۲	۱۹/۸۵	۸/۴۵	۷۵/۳۰	۱۲۶/۴۶	۸/۷	۱۱۷	۰	۱۹۹/۹
۱۹	۱۹۴/۸	۲۵/۱۵	۴/۵۶	۷۵/۳۰	۱۲۶/۴۶	۷/۳	۱۸۲	۱	۲۰۱/۴
۲۰	۱۹۴/۸	۱۹/۸۵	۴/۵۶	۶۴/۷۰	۱۲۶/۴۶	۸/۷	۱۴۵	۰	۲۰۷/۶
۲۱	۱۹۴/۸	۱۹/۸۵	۸/۴۵	۶۴/۷۰	۱۳۳/۵۴	۷/۳	۱۸۱	۰	۲۰۱/۵
۲۲	۱۹۱/۲	۲۵/۱۵	۸/۴۵	۷۵/۳۰	۱۳۳/۵۴	۸/۷	۱۳۴	۰	۱۹۹/۱
۲۳	۱۹۴/۸	۲۵/۱۵	۸/۴۵	۶۴/۷۰	۱۳۳/۵۴	۸/۷	۱۷۳	۰	۲۰۹/۶
۲۴	۱۹۱/۲	۲۵/۱۵	۸/۴۵	۷۵/۳۰	۱۲۶/۴۶	۸/۷	۱۱۱	۰	۱۹۹/۱
۲۵	۱۹۱/۲	۱۹/۸۵	۸/۴۵	۶۴/۷۰	۱۲۶/۴۶	۸/۷	۱۱۷	۰	۱۹۹/۳
۲۶	۱۹۴/۸	۲۵/۱۵	۸/۴۵	۶۴/۷۰	۱۳۳/۵۴	۷/۳	۱۹۴	۰	۲۰۱/۵
۲۷	۱۹۱/۲	۲۵/۱۵	۴/۵۶	۶۴/۷۰	۱۲۶/۴۶	۷/۳	۱۴۶	۱	۱۹۸/۵

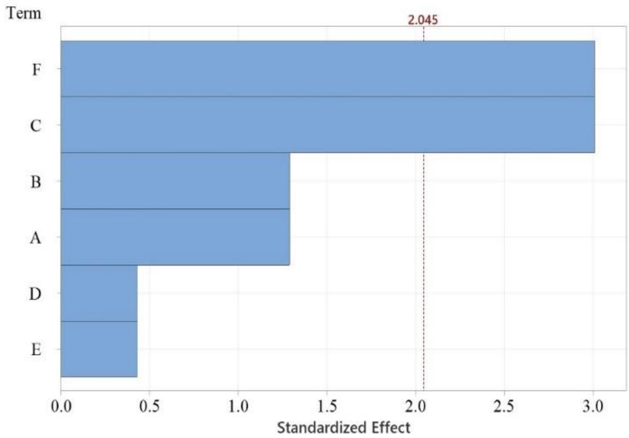
ادامه جدول ۷ نتایج طراحی آزمایش به روش پلاکت ـ برمن

۲۸	۱۹۴/۸	۱۹/۸۵	۸/۴۵	۷۵/۳۰	۱۳۳/۵۴	۸/۷	۱۷۳	۰	۲۰۶/۵
۲۹	۱۹۱/۲	۲۵/۱۵	۴/۵۶	۶۴/۷۰	۱۳۳/۵۴	۸/۷	۱۳۷	۰	۱۹۹/۰
۳۰	۱۹۱/۲	۱۹/۸۵	۸/۴۵	۷۵/۳۰	۱۳۳/۵۴	۷/۳	۱۷۶	۰	۱۹۹/۲
۳۱	۱۹۱/۲	۱۹/۸۵	۴/۵۶	۶۴/۷۰	۱۳۳/۵۴	۷/۳	۱۷۷	۱	۱۹۸/۴
۳۲	۱۹۱/۲	۱۹/۸۵	۸/۴۵	۷۵/۳۰	۱۳۳/۵۴	۷/۳	۱۷۶	۰	۱۹۹/۲
۳۳	۱۹۴/۸	۲۵/۱۵	۸/۴۵	۷۵/۳۰	۱۳۳/۵۴	۷/۳	۱۹۴	۰	۲۰۱/۵
۳۴	۱۹۴/۸	۲۵/۱۵	۸/۴۵	۷۵/۳۰	۱۲۶/۴۶	۷/۳	۱۷۷	۱	۲۰۱/۵
۳۵	۱۹۱/۲	۲۵/۱۵	۴/۵۶	۷۵/۳۰	۱۲۶/۴۶	۷/۳	۱۴۶	۱	۱۹۸/۵
۳۶	۱۹۱/۲	۲۵/۱۵	۸/۴۵	۷۵/۳۰	۱۲۶/۴۶	۸/۷	۱۱۱	۰	۱۹۹/۱

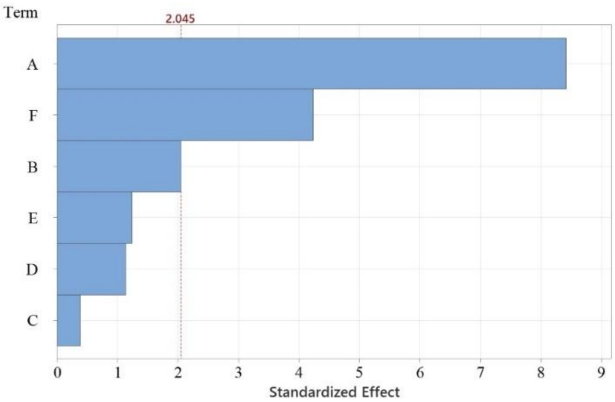
نمودار پارتو (Pareto)، کمک بسیاری در تعیین پارامترهای مؤثر دارد و هر کدام از عوامل ورودی که از خط مبنای قرمزرنگ عبور کرده باشند، به عنوان پارامتر اثرگذار شناخته می‌شوند. در شکل‌های (۱۳) تا (۱۵)، پارامترهای گذرنده از خط مبنا به عنوان پارامترهای اثرگذار قابل مشاهده هستند.



شکل ۱۳ غربالگری برای نیروی گیره‌بندی



شکل ۱۴ غربالگری برای عیب پر نشدن قالب



شکل ۱۵ غربالگری برای عیب سوختگی

نتایج غربالگری نشان می‌دهد که برای جلوگیری از سوختن پلیمر باید مقدار دمای مذاب و مدت زمان تزریق تا حد امکان کاهش داده و مدت زمان خنک‌کاری را افزایش داد. برای جلوگیری از پر نشدن قطعه، باید مقدار مدت زمان تزریق و مدت زمان فشار نگهداری را کاهش داد تا سرعت تزریق مواد در مراحل پر کردن و نگهداری بیشتر شود و سر نوک نازل، مواد به اندازه کافی برای شروع تزریق قطعه جدید وجود داشته باشد؛ بنابراین برای جلوگیری از وقوع حبس هوا، تعیین مدت زمان تزریق باید با دقت انتخاب شود. برای کاهش نیروی گیره‌بندی لازم باید مقدار دمای مذاب، فشار تزریق و سرعت تزریق مواد در مراحل پر کردن و نگهداری را کاهش داد تا نیروی کمتری برای مقابله با جریان تزریق در قالب و جدا نشدن دو نیمه قالب لازم باشد. پس از شناسایی پارامترهای مؤثر، یک عامل غیر مؤثر شناسایی شد. به منظور بررسی عمیق‌تر پارامترهای مؤثر، طراحی آزمایشی به روش پاسخ سطح و از نوع طراحی مرکب مرکزی با

۳۲ آزمایش و با مقدار آلفا (Alpha) برابر با ۲/۸۲۸ انجام شد. مقدار عامل غیرمؤثر D، برابر با مقدار ثابت ۶۴/۷ در نظر گرفته شد و نتایج آن در جدول (۸) آورده شده است.

جدول ۸ نتایج طراحی آزمایش به روش مرکب مرکزی

اجرا	پارامترهای ورودی مؤثر					پارامترهای خروجی		
	A	B	C	E	F	G	H	I
۱	۱۹۳/۰	۲۲/۵۰	۶/۵۰	۱۳۰/۰۰	۸/۰	۱۵۰	۱	۲۰۰/۵
۲	۱۹۱/۲	۱۹/۸۵	۴/۵۶	۱۳۳/۵۴	۷/۳	۱۷۰	۱	۱۹۸/۰
۳	۱۹۴/۸	۲۵/۱۵	۴/۵۶	۱۳۳/۵۴	۷/۳	۱۹۶	۱	۲۰۱/۴
۴	۱۹۸/۰	۲۲/۵۰	۶/۵۰	۱۳۰/۰۰	۸/۰	۱۹۱	۰	۲۰۳/۹
۵	۱۹۱/۲	۲۵/۱۵	۴/۵۶	۱۳۳/۵۴	۸/۷	۱۳۵	۰	۱۹۸/۹
۶	۱۹۱/۲	۲۵/۱۵	۸/۴۴	۱۲۶/۴۶	۸/۷	۱۱۲	۰	۱۹۹/۰
۷	۱۹۳/۰	۲۲/۵۰	۶/۵۰	۱۳۰/۰۰	۸/۰	۱۵۰	۱	۲۰۰/۵
۸	۱۸۸/۰	۲۲/۵۰	۶/۵۰	۱۳۰/۰۰	۸/۰	۱۲۲	۰	۱۹۵/۹
۹	۱۹۳/۰	۱۵/۰۱	۶/۵۰	۱۳۰/۰۰	۸/۰	۱۶۶	۱	۲۰۰/۱
۱۰	۱۹۳/۰	۲۲/۵۰	۶/۵۰	۱۱۹/۹۹	۸/۰	۱۱۵	۰	۲۰۰/۵
۱۱	۱۹۴/۸	۲۵/۱۵	۸/۴۴	۱۳۳/۵۴	۸/۷	۱۷۷	۱	۲۰۷/۶
۱۲	۱۹۴/۸	۱۹/۸۵	۸/۴۴	۱۲۶/۴۶	۸/۷	۱۴۳	۰	۲۰۲/۹
۱۳	۱۹۳/۰	۲۲/۵۰	۶/۵۰	۱۳۰/۰۰	۸/۰	۱۵۰	۱	۲۰۰/۵
۱۴	۱۹۳/۰	۲۲/۵۰	۶/۵۰	۱۴۰/۰۱	۸/۰	۲۰۳	۱	۲۰۰/۵
۱۵	۱۹۳/۰	۲۲/۵۰	۶/۵۰	۱۳۰/۰۰	۶/۰	۱۶۲	۱	۱۹۹/۵
۱۶	۱۹۱/۲	۱۹/۸۵	۸/۴۴	۱۲۶/۴۶	۷/۳	۱۵۸	۱	۱۹۸/۰
۱۷	۱۹۴/۸	۱۹/۸۵	۴/۵۶	۱۲۶/۴۶	۷/۳	۱۷۸	۱	۲۰۱/۶
۱۸	۱۹۳/۰	۲۲/۵۰	۶/۵۰	۱۳۰/۰۰	۸/۰	۱۵۰	۱	۲۰۰/۵
۱۹	۱۹۳/۰	۲۲/۵۰	۱/۰۱	۱۳۰/۰۰	۸/۰	۱۵۵	۱	۲۰۰/۶
۲۰	۱۹۳/۰	۲۲/۵۰	۱۱/۹۹	۱۳۰/۰۰	۸/۰	۱۵۱	۱	۲۰۰/۳
۲۱	۱۹۳/۰	۲۲/۵۰	۶/۵۰	۱۳۰/۰۰	۱۰/۰	۱۳۶	۰	۲۱۱/۷
۲۲	۱۹۴/۸	۱۹/۸۵	۸/۴۴	۱۳۳/۵۴	۷/۳	۲۰۲	۰	۲۰۱/۶
۲۳	۱۹۳/۰	۲۲/۵۰	۶/۵۰	۱۳۰/۰۰	۸/۰	۱۵۰	۱	۲۰۰/۵
۲۴	۱۹۳/۰	۲۹/۹۹	۶/۵۰	۱۳۰/۰۰	۸/۰	۱۴۸	۱	۲۰۰/۲
۲۵	۱۹۱/۲	۲۵/۱۵	۴/۵۶	۱۲۶/۴۶	۷/۳	۱۴۶	۱	۱۹۷/۹
۲۶	۱۹۴/۸	۱۹/۸۵	۴/۵۶	۱۳۳/۵۴	۸/۷	۱۷۱	۰	۲۰۳/۶
۲۷	۱۹۱/۲	۱۹/۸۵	۴/۵۶	۱۲۶/۴۶	۸/۷	۱۱۷	۰	۱۹۸/۲
۲۸	۱۹۱/۲	۱۹/۸۵	۸/۴۴	۱۳۳/۵۴	۸/۷	۱۴۷	۰	۲۰۷/۳
۲۹	۱۹۴/۸	۲۵/۱۵	۸/۴۴	۱۲۶/۴۶	۷/۳	۱۶۸	۰	۲۰۱/۴
۳۰	۱۹۳/۰	۲۲/۵۰	۶/۵۰	۱۳۰/۰۰	۸/۰	۱۵۰	۱	۲۰۰/۵
۳۱	۱۹۱/۲	۲۵/۱۵	۸/۴۴	۱۳۳/۵۴	۷/۳	۱۶۱	۱	۱۹۸/۸
۳۲	۱۹۴/۸	۲۵/۱۵	۴/۵۶	۱۲۶/۴۶	۸/۷	۱۵۴	۰	۲۰۵/۶

تحلیل واریانس، روشی آماری به منظور بررسی یک متغیر کمی به عنوان تابعی از یک یا چند متغیر کمی یا کیفی است. این روش، اثرات خطی، مربعات و برهم‌کنش دوتایی پارامترهای ورودی بر خروجی را مورد بررسی قرار می‌دهد. در این پژوهش، مقبولیت مدل پیشنهادی ارائه شده به کمک تحلیل واریانس بررسی شده و نتایج آن در جدول (۹) آمده است. به دلیل مقدار P کمتر از ۰/۰۵، صحت مدل‌ها تأیید می‌گردد و بالاتر بودن مقدار F، به معنای تأثیر بیشتر عامل است. از جدول (۹) می‌توان دریافت که دمای مذاب، بیشترین تأثیر را بر روی نیروی گیره‌بندی دارد و زمان تزریق مهم‌ترین عامل ورودی در ایجاد عیوب سوختن و پر نشدن قالب است. دقت مدل تحلیل داده با ضریب رگرسیون مورد ارزیابی قرار گرفت. محدوده مقدار ضریب رگرسیون بین ۰ و ۱ است و اگر مقدار آن نزدیک به ۱ باشد، نشان دهنده تطابق خوب مدل با پاسخ‌ها است و مقادیر ضرایب همبستگی مدل‌ها در جدول (۱۰) آورده شده است.

جدول ۹ نتایج تحلیل واریانس برای مدل رگرسیون

رابطه	منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
	مدل G	۲۰	۱۵۴۵۱/۰	۷۷۲/۵۵	۷/۴۱	۰/۰۰۱
خطی	A	۱	۵۹۹۹/۶	۵۹۹۹/۶۴	۵۷/۵۴	۰/۰۰۰
	E	۱	۵۸۲۹/۲	۵۸۲۹/۲۱	۵۵/۹۰	۰/۰۰۰
	F	۱	۲۷۴۸/۲	۲۷۴۸/۱۹	۲۶/۳۶	۰/۰۰۰
	خطا	۱۱	۱۱۴۷/۰	۱۰۴/۲۴		
	مجموع	۳۱	۱۶۵۹۸/۰			
خطی	مدل H	۲۰	۶/۵۹۲۳۵	۰/۳۲۹۶۲	۳/۲۲	۰/۰۲۵
	F	۱	۱/۹۱۵۲۱	۱/۹۱۵۲۱	۱۸/۷۰	۰/۰۰۱
مربعات	AA	۱	۱/۵۰۰۳۸	۱/۵۰۰۳۸	۱۴/۶۵	۰/۰۰۳
برهم‌کنش دوتایی	BE	۱	۰/۵۶۲۵۰	۰/۵۶۲۵۰	۵/۴۹	۰/۰۳۹
	CF	۱	۰/۵۶۲۵۰	۰/۵۶۲۵۰	۵/۴۹	۰/۰۳۹
	AF	۱	۰/۵۶۲۵۰	۰/۵۶۲۵۰	۵/۴۹	۰/۰۳۹
	خطا	۱۱	۱/۱۲۶۴۰	۰/۱۰۲۴۰		
	مجموع	۳۱	۷/۷۱۸۷۵			
	مدل I	۲۰	۳۰۳/۲۹۱	۱۵/۱۶۵	۱۰/۸۶	۰/۰۰۰
خطی	A	۱	۸۵/۲۴۲	۸۵/۲۴۲	۶۱/۰۳	۰/۰۰۰
	F	۱	۱۰۸/۴۳۵	۱۰۸/۴۳۵	۷۷/۶۳	۰/۰۰۰
مربعات	FF	۱	۳۹/۰۱۷	۳۹/۰۱۷	۲۷/۹۳	۰/۰۰۰
برهم‌کنش دوتایی	AB	۱	۱۰/۸۹۰	۱۰/۸۹۰	۷/۸۰	۰/۰۱۸
	CE	۱	۱۴/۸۲۲	۱۴/۸۲۲	۱۰/۶۱	۰/۰۰۸
	EF	۱	۷/۲۹۰	۷/۲۹۰	۵/۲۲	۰/۰۴۳
	خطا	۱۱	۱۵/۳۶۴	۱/۳۹۷		
	مجموع	۳۱	۳۱۸/۶۵۵			

جدول ۱۰ ضرایب همبستگی مدل

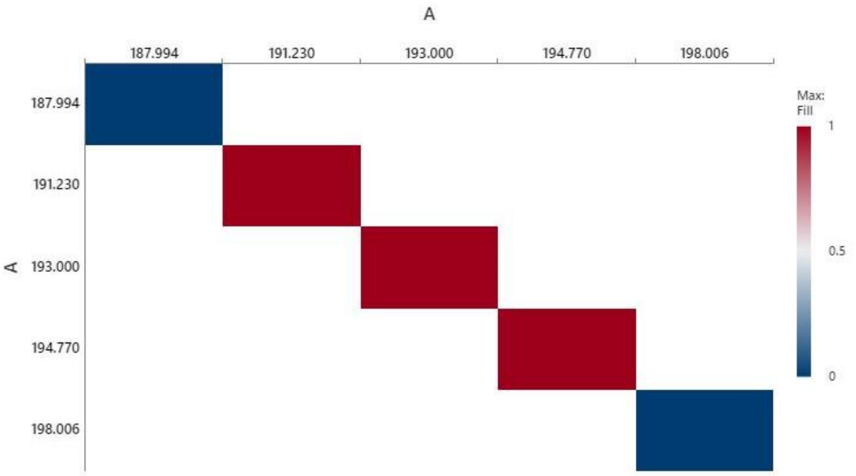
پاسخ	G	H	I
مقدار ضریب رگرسیون (٪)	۹۳/۰۹	۸۵/۴۱	۹۵/۱۸

در ادامه به تفسیر نتایج حاصل از تحلیل واریانس پرداخته می‌شود. ماتریس همبستگی، جدولی ساده است که ضرایب همبستگی بین تمام جفت متغیرهای مختلف را نشان می‌دهد و ابزاری کاربردی در شناسایی و تجسم الگو برای داده‌های فراوان است. همان طور که در شکل (۱۶) نشان داده شده است، ماتریس همبستگی بین متغیرهای ورودی و پاسخ، نتایج ارزشمندی در حل مسائل بهینه‌سازی ارائه می‌دهد. اعداد جدول در بازه ۱- تا ۱+ قرار دارد و هر قدر این عدد به ۱- نزدیک‌تر باشد، به این معنا است که دو متغیر ارتباط معکوس با هم دارند و هر قدر این عدد به ۱+ نزدیک باشد، نشان می‌دهد دو متغیر ارتباط مستقیمی با هم دارند. به عنوان مثال می‌توان مشاهده کرد که با افزایش دمای مذاب، احتمال تشکیل عیب سوختن و نیروی گیره‌بندی لازم افزایش می‌یابد و با کاهش مدت زمان تزریق، احتمال عیب سوختن و نیروی گیره‌بندی لازم کاهش می‌یابد. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت برای تولید قطعه سالم و باکیفیت سطح بالا، در انتخاب دمای مذاب و مدت زمان تزریق، باید حساسیت بیشتری نشان داده شود. از لحاظ فنی می‌توان بیان کرد که با افزایش سرعت تزریق در دمای مذاب ثابت، ماده کاهش گرانروی کمتری نسبت به افزایش دمای مذاب از خود نشان می‌دهد و با افزایش فشار تزریق، نیروی گیره‌بندی بیشتری برای بسته نگه داشتن قالب در سطح مقطع ثابت نیاز است. با افزایش فشار تزریق، گرانروی ماده کاهش پیدا کرده و ماده را می‌توان با سرعت بیشتری تزریق نمود تا عیب پر نشدن قالب در قطعه ایجاد نشود. دمای جبهه جریان مذاب در قالب با افزایش دمای مذاب و کاهش سرعت تزریق، افزایش یافته و احتمال ایجاد عیب سوختگی به دلیل ایجاد حبس هوا و تخریب پلیمر افزایش می‌یابد.

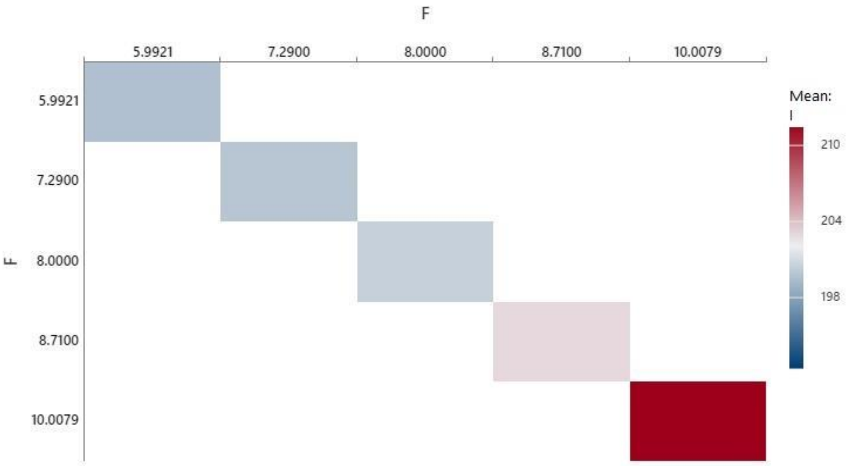
با توجه به جدول (۹) می‌توان دریافت که عوامل ورودی فقط تأثیر خطی مؤثر بر پاسخ G دارند و مقدار تأثیر خطی آن از شکل (۱۶) قابل استنتاج است. نقشه حرارتی برای بررسی و مشاهده تأثیر مربعات یک عامل در خروجی کاربرد دارد. متغیر AA و FF با توجه به جدول (۹) به ترتیب برای عیوب پر نشدن قالب و سوختگی مؤثر هستند و نقشه حرارتی آن‌ها به ترتیب در شکل (۱۷) و شکل (۱۸) نشان داده شده است. هر قدر پارامتر ورودی در محدوده رنگ قرمز انتخاب شوند، به مقدار حداکثر خروجی مد نظر نزدیک می‌شوند. از شکل (۱۷) و شکل (۱۸) به ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که برای عیب پر نشدن قالب، انتخاب مقدار فاکتور A، بدون توجه به فاکتورهای دیگر، حساس است و برای عیب سوختگی تا حد امکان کمترین مقدار F را باید انتخاب کرد.

	A	B	C	E	F	G	H	I
A	1							
B	1.78E-17	1						
C	0	1.62E-17	1					
E	-4.4E-18	-2.4E-17	-1.2E-17	1				
F	5.52E-18	1.84E-17	-2.5E-17	0	1			
G	0.601222	-0.12063	-0.01415	0.592621	-0.40691	1		
H	-0.06363	0.063633	-0.06363	0.243588	-0.49812	0.31221	1	
I	0.517211	-0.00314	0.1045	0.124787	0.583344	0.187669	-0.30371	1

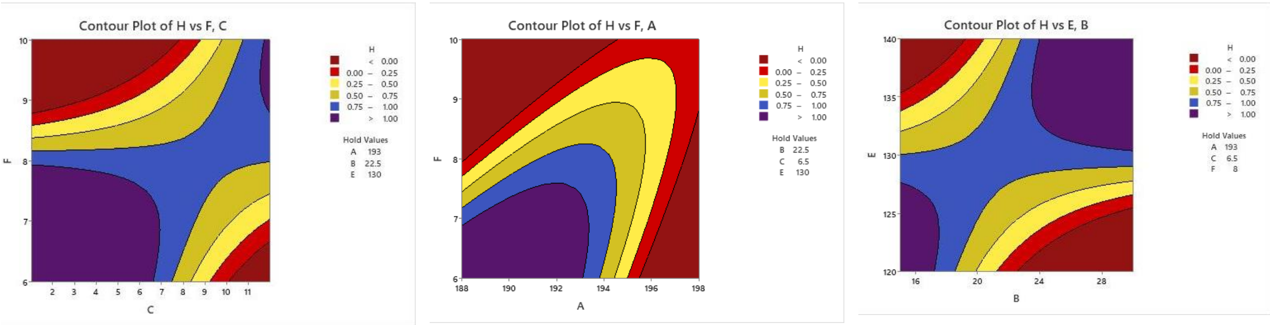
شکل ۱۶ تأثیر خطی پارامترهای مؤثر



شکل ۱۷ نقشه حرارتی برای عیب پر نشدن قالب

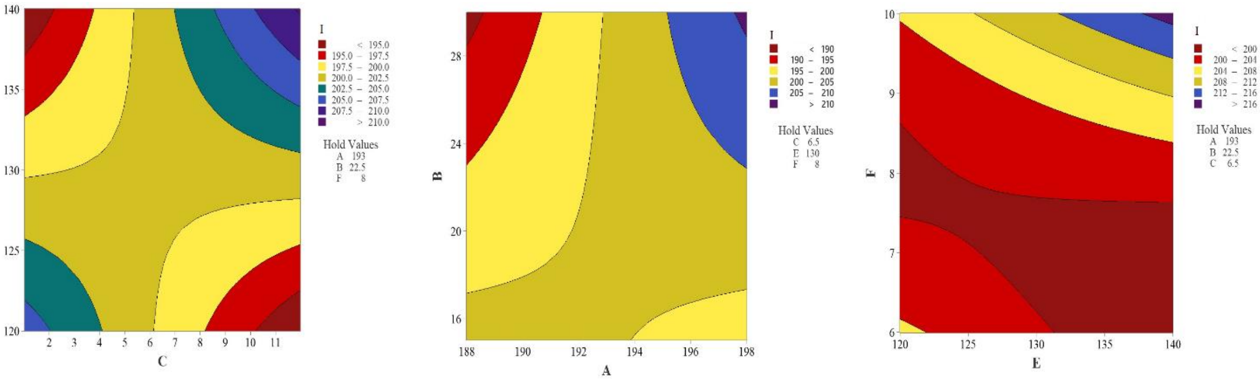


شکل ۱۸ نقشه حرارتی برای عیب سوختگی



(ج) (ب) (الف)

شکل ۱۹ برهمکنش دوتایی عوامل: الف) مدت زمان خنک‌کاری و فشارتزریق، ب) دمای مذاب و زمان تزریق و ج) زمان تزریق و مدت زمان فشار نگهداری برای عیب پر نشدن قالب



(ج) (ب) (الف)

شکل ۲۰ برهمکنش دوتایی عوامل: الف) مدت زمان تزریق و فشار تزریق، ب) دمای مذاب و مدت زمان خنک‌کاری و ج) فشار تزریق و مدت زمان فشار نگهداری برای عیب سوختگی

نحوه برهم‌کنش‌های دوتایی عوامل مختلف به صورت نمودارهای کانتور دوبعدی در شکل (۱۹) و شکل (۲۰) نشان داده شده است. برهم‌کنش‌های دوتایی مؤثر برای پاسخ H در شکل (۱۹) نشان داده شده است و می‌توان نتیجه گرفت، برای جلوگیری از عیب پر نشدن قالب، پارامتر B و E همزمان با هم در حد بالا یا پایین خود قرار گیرند و برای دو پارامتر C و F نیز،

این اطلاعاتی برداشت می‌شود و برای دو پارامتر A و F، به ترتیب تا حد امکان در پایین‌ترین مقدار خود همزمان قرار بگیرند.

شکل (۲۰ ـ الف) اثر ترکیبی فشار تزریق و مدت زمان تزریق را نشان می‌دهد و احتمال ایجاد عیب، متناسب با افزایش این دو پارامتر، افزایش می‌یابد. شکل (۲۰ ـ ب) اثر ترکیبی دمای مذاب و مدت زمان خنک‌کاری را نشان می‌دهد. هر قدر از مقدار متوسط دمای مذاب فراتر برویم، باعث ایجاد عیب می‌شود. شکل (۲۰ ـ ج) اثر ترکیبی مدت زمان فشار نگهداری و فشار تزریق را بر روی عیب سوختن نشان می‌دهد در حالی که دمای ۲۰۲ معیار است؛ بنابراین، قرار دادن این دو پارامتر همزمان در بیشترین یا کمترین مقدار ممکن، باعث ایجاد عیب می‌شود.

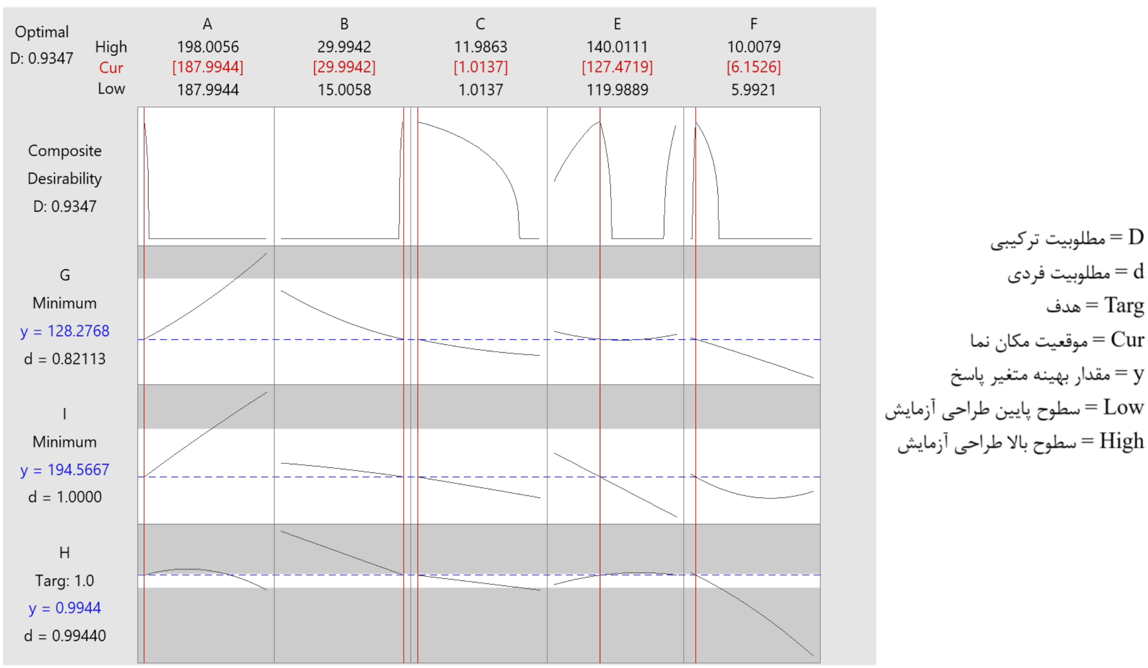
بهینه‌سازی

بهینه‌سازی، فرایندی است که در آن بهترین جواب از میان مجموعه جواب‌های ممکن با توجه به قیدهای توابع هدف، برای یک مسئله خاص انتخاب می‌شود. در این پژوهش با توجه به قید سالم بودن قطعه از لحاظ فیزیکی و با هدف کاهش نیروی گیره-بندی، باید مقدار بهینه پارامترهای ورودی برای به حداقل رساندن حداکثر مقدار ممکن پارامترهای نیروی گیره‌بندی و دمای جبهه جریان مذاب به همراه پر شدن کامل قالب تعیین شوند. در ادامه بهینه‌سازی بر روی رابطه‌های (۱) تا (۳) انجام شد. مقادیر بهینه ورودی شامل دمای مذاب ۱۸۸/۰ درجه سانتی‌گراد، مدت زمان سیکل خنک‌کاری ۲۹/۹۹ ثانیه، مدت‌زمان فشار نگهداری ۱/۰۱ ثانیه، فشار نگهداری ۶۴/۷۰ مگاپاسکال، فشار تزریق ۱۲۷/۴۷ مگاپاسکالو مدت زمان تزریق ۶/۱۵ ثانیه به دست آمد. مقادیر بهینه خروجی با نیروی گیره‌بندی ۱۲۸ تنو حداکثر دمای جبهه جریان مذاب ۱۹۴/۶ درجه سانتی‌گراد همراه با پر شدن کامل قالب پیش‌بینی شد. در شکل (۲۱) نیز می‌توان نتایج بهینه‌سازی را مشاهده کرد. در نهایت با مقادیر بهینه تحلیل آماری، شبیه‌سازی انجام شد و مقدار میانگین خطای ۶/۰۳٪ با مقادیر خروجی پیش‌بینی شده توسط تحلیل آماری دارد که در جدول (۱۱)، مقادیر خروجی شبیه‌سازی نیز آورده شده است. در شکل (۲۲) نتایج بهینه تحلیل آماری به صورت شبیه‌سازی و تجربی نشان داده شده است که نتایج یکسانی را نشان می‌دهد.

G = 19980 - 142A - 69.8E - 358F (۱)

H = -954 - 32F - 0.04AA + 0.15AF + 0.02BE + 0.14CF (۲)

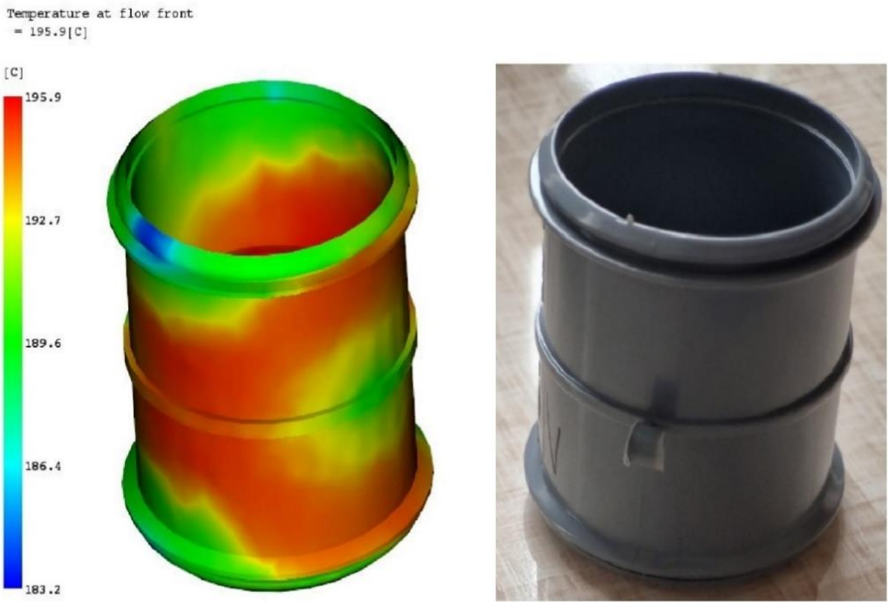
I = -1569 + 15.4A - 83.3F + 1.27FF + 0.18AB + 0.14CE + 0.27EF (۳)



شکل ۲۲ بهینه‌سازی

جدول ۱۱ مقایسه نتایج بهینه به دست آمده از روش طراحی مرکب مرکزی با شبیه‌سازی

	نتیجه عددی			نتیجه شبیه‌سازی با مقادیر بهینه		
	G	H	I	G	H	I
	۱۲۸	۱	۱۹۴/۶	۱۵۵	۱	۱۹۵/۹
خطا (٪)	۱۷/۴۲	۰	۰/۶۶			
میانگین خطا (٪)	۶/۰۳					



شکل ۲۳ قطعه بدون عیب

در این تحقیق، عوامل فرایندی شامل دمای مذاب، مدت زمان خنک‌کاری، فشار نگهداری، مدت زمان فشار نگهداری، فشار تزریق و مدت زمان تزریق بر کیفیت فرایند تزریق پلاستیک بررسی شدند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فشار تزریق، نیروی گیره‌بندی بیشتری نیاز است و فشار تزریق کم منجر به بروز عیب پر نشدن قالب می‌شود که با نتیجه پژوهش [13] مطابقت دارد. در پژوهش [13] محدوده فشار تزریق از ۱۰ تا ۸۰ مگاپاسکالدر تولید قطعه‌ای از جنس ای‌بی‌اس (ABS) بررسی گردید؛ اما در این پژوهش محدوده فشار تزریق از ۱۱۹/۹۹ تا ۱۱۴/۰۱ مگاپاسکالاست. در پژوهش [13] عیب پر نشدن قالب با استفاده از میزان پر نشدن قالب بررسی شده است؛ ولی در پژوهش حاضر به دلیل محدودیت‌های نرم‌افزاری و افزایش دقت تحلیل داده، عیب پر نشدن قالب به صورت صفر یا یک (خروجی گسسته) بیان شد. نیروی گیره‌بندی بیشتر به دلیل بسته نگه داشتن قالب در فرایند تزریق با فشار تزریق بالاتر نیاز است و با افزایش فشار تزریق، گرانروی ماده کاهش می‌یابد و در نتیجه، احتمال بروز عیب پر نشدن قالب کاهش می‌یابد.

با توجه به شکل (۱۶) نیروی گیره‌بندی زیاد منجر به تهویه هوای ضعیف و عیب پر نشدن قالب می‌شود که با پژوهش [25] مطابقت دارد. در پژوهش [25] تزریق نمونه دمبلی شکل از جنس پلی‌کربنات (Polycarbonate) و ای‌بی‌اس در شرایط مختلف نیروی گیره‌بندی و به صورت تجربی انجام شد. محاسبه نیروی گیره‌بندی در پژوهش [25] با استفاده از نصب سنسور کرنش بر روی میله مهار قالب انجام شد؛ ولی در پژوهش حاضر، میزان استفاده از تناژ دستگاه به کمک حل عددی با توجه به محدودیت‌های ماشین تزریق از نوع تاگل استخراج شد.

در پژوهش [26] فقط عامل سرعت تزریق به عنوان متغیر ورودی برای بررسی عیب سوختگی در نظر گرفته شد و بررسی این عیب به صورت تجربی و با کمک سنسور گاز بود؛ ولی در این پژوهش شش عامل فرایندی برای بررسی عیب سوختگی در

نظر گرفته شده است. بر خلاف نتیجه پژوهش [26] که با کاهش مدت زمان تزریق، احتمال بروز عیب سوختگی افزایش می‌یابد، در این پژوهش نتیجه گرفته شد که به ترتیب با افزایش دمای مذاب و مدت زمان تزریق، احتمال بروز این عیب، افزایش می‌یابد. بر خلاف پژوهش‌های گذشته [7,26,27] که به صورت تجربی، عیب سوختگی را رفع کردند، در این پژوهش با شناسایی نقطه بحرانی تخریب پلیمر در قالب به کمک حل عددی، نیاز به انجام فرایند تجربی برای رفع عیب را از بین برد. در نهایت صحت معادلات حاکم بر پاسخ‌ها، تأیید شده و می‌توان از این معادله‌ها برای تولید بوشن در آینده استفاده کرد تا با توجه به مقادیر ورودی، نتایج تجربی از قبل قابل‌پیش‌بینی باشد.

نتیجه‌گیری

این تحقیق به منظور بررسی تأثیر و بهینه‌سازی عامل‌های فرایندی بر عیوب سوختن، پر نشدن قالب و نیروی گیره‌بندی در فرایند تزریق قطعه بوشن ۶۳ است. این قطعه به وسیله دستگاهی با نیروی گیره‌بندی ۲۲۰ تن تولید می‌شود. پارامترهای فرایندی (ورودی) شامل دمای مذاب، مدت زمان خنک‌کاری، مدت زمان فشار نگهداری، فشار نگهداری، فشار تزریق و مدت زمان تزریق است. در ادامه، فرایند در نرم‌افزار مولدفلو شبیه‌سازی شد. پس از تأیید صحت مدل شبیه‌سازی به کمک نتایج تجربی، بهینه‌سازی پارامترهای فرایندی به وسیله تحلیل آماری برای به حداقل رساندن عیوب سوختن و پر نشدن قالب با حداقل نیروی گیره‌بندی مورد نیاز انجام شد. برای این هدف در طراحی غربالگری به روش پلاکت ـ برمن مشاهده شد، عوامل مؤثر بر نیروی گیره‌بندی، به ترتیب دمای مذاب، فشار تزریق، مدت زمان تزریق و مدت زمان فشار نگهداری است. برای عیب پر نشدن قالب، فقط پارامترهای مدت زمان اعمال فشار نگهداری و مدت زمان تزریق مؤثر هستند و برای عیب سوختن، عوامل دمای مذاب، زمان تزریق و مدت زمان خنک‌کاری مؤثر بر آن هستند. پارامتر فشار نگهداری به عنوان عامل غیر مؤثر شناسایی شد. سپس برای دستیابی به معادله رگرسیونی دقیق‌تر برای پیش‌بینی فرایند تزریق در کارگاه، طراحی آزمایشی به روش مرکب مرکزی انجام شد. با بررسی اثرات متقابل عوامل فرایند می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش دمای مذاب و مدت زمان فشار نگهداری، زمان کمتری برای تزریق کامل قالب لازم است ولی احتمال تشکیل عیب سوختن در فشار تزریق بالا را افزایش می‌دهد و نیاز به نیروی گیره‌بندی بیشتری دارد. بررسی تأثیر و انتخاب مقدار عوامل بر پاسخ‌ها به منظور رفع عیوب، استفاده از بهینه‌سازی را آشکار می‌سازد. در نهایت شبیه‌سازی با مقادیر بهینه تحلیل آماری انجام شد و با میانگین خطای ۶/۰۳٪ با کمترین نیروی گیره‌بندی امکان‌پذیر، عیوب مورد نظر نیز رفع گردید و در تست تجربی نیز قطعه سالمی تولید شد. بهینه‌سازی پارامترهای فرایندی به کمک شبیه‌سازی، هزینه بسیار کمتری در مقابل اصلاح قالب و تعویض دستگاه با نیروی گیره‌بندی بالاتر دارد و همچنین باعث بهبود دقت ابعادی محصول، عدم هدر رفت مواد خام و کاهش زمان تولید می‌گردد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

دمای مذاب، °C	A
مدت زمان سیکل خنک‌کاری، s	B
مدت زمان فشار نگهداری، s	C
فشار نگهداری، MPa	D
فشار تزریق، MPa	E
مدت زمان تزریق، s	F
حداکثر نیروی گیره‌بندی لازم، t	G
عیب پر نشدن قالب	H
حداکثر دمای جبهه جریان مذاب، °C	I

واژه نامه

عیب سوختگی	Burn mark defect
عیب پر نشدن قالب	Short shot defect
نیروی گیره‌بندی	Clamping force
فشار نگهداری	Holding pressure
مدت‌زمان فشار نگهداری	Packing time
دمای مذاب	Melt temperature
شبیه‌سازی	Simulation
نرم‌افزار مولدفلو	Moldflow software
معادله رگرسیون	Regression equation
طراحی آزمایش	Design of Experiment
طراحی مرکب مرکزی	Central Composite Design
غربالگری به روش پلاکت ـ برمن	Screening by Plackett-Burman method

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند که از امکانات فراهم‌شده توسط شرکت «یزد اتصال پلیمر» در حین انجام تحقیقات تقدیر کنند.

مراجع

[1] S.H. Tang, Y.M. Kong, S.M. Sapuan, R. Samin, S. Sulaiman, "Design and thermal analysis of plastic injection mould," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 171, no. 2, pp. 259–267, 2006. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.06.075

[2] Y. Xu, G. Liu, K. Dang, N. Fu, X. Jiao, J. Wang, P. Xie, W. Yang, "A novel strategy to determine the optimal clamping force based on the clamping force change during injection molding," *Polymer Engineering & Science*, vol. 61, no. 12, pp. 3170–3178, 2021. https://doi.org/10.1002/pen.25829

[3] J.-Y. Chen, C.-Y. Liu, M.-S. Huang, "Tie-bar elongation based filling-to-packing switchover control and prediction of injection molding quality," *Polymers (Basel)*, vol. 11, no. 7, pp. 1168, 2019. https://doi.org/10.3390/polym11071168

[4] W. Su, H. Peng, "A real- time clamping force measurement eigenvalue for prediction, adjustment, and control of injection product quality," *Polymer Engineering & Science*, vol. 61, no. 3, pp. 420–431, 2021. https://doi.org/10.1002/pen.25585

[5] Z. Jiao, H. Liu, P. Xie, W. Yang, "Clamping characteristics study on different types of clamping unit," In AIP Conference Proceedings, vol. 1664, no. 1, 2015, p. 110009. https://doi.org/10.1063/1.4918484

[6] H. Oktem, T. Erzurumlu, I. Uzman, "Application of Taguchi optimization technique in determining plastic injection molding process parameters for a thin-shell part," *Materials & Design*, vol. 28, no. 5, pp. 1271–1278, 2007. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.12.013

[7] S. Beheshtian Mesgaran, F. Elhami Nik, S.E. Seyyed Mousavi, "Experimental and Numerical Analysis of Burn Marks and Shrinkage Effect on Injection Molding," International Conference on Materials and Processing, American Society of Mechanical Engineers, 2017, p. V001T02A038-V001T02A038. https://doi.org/10.1115/MSEC2017-3009

[8] B. Ravikiran, D.K. Pradhan, S. Jeet, D.K. Bagal, A. Barua, S. Nayak, "Parametric optimization of plastic injection moulding for FMCG polymer moulding (PMMA) using hybrid Taguchi-WASPAS-Ant Lion optimization algorithm," *Materials Today: Proceedings*, vol. 56, no. 1, pp. 2411–2420, 2022. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.204

[9] A. Mollaei Ardestani, G. Azamirad, Y. Shokrollahi, M. Calaon, J.H. Hattel, M. Kulahci, R. Soltani, G. Tosello, "Application of Machine Learning for Prediction and Process Optimization—Case Study of Blush Defect in Plastic Injection Molding," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 4, p. 2617, 2023. https://doi.org/10.3390/app13042617

[10] H. Hassan, N. Regnier, C. Pujos, E. Arquis, G. Defaye, "Modeling the effect of cooling system on the shrinkage and temperature of the polymer by injection molding," *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, no. 8-9, pp. 1547–1557,

2010. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.02.025

[11] S. Hwang, P.P. Hsu, C. Chiang, "Shrinkage study of textile roller molded by conventional/microcellular injection-molding process," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 35, no. 6, pp. 735–743, 2008. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.02.011

[12] F. Yin, H. Mao, L. Hua, W. Guo, M. Shu, "Back propagation neural network modeling for warpage prediction and optimization of plastic products during injection molding," *Materials & Design*, vol. 32, no. 4, pp. 1844–1850, 2011. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.12.022

[13] S. Kitayama, S. Natsume, "Multi-objective optimization of volume shrinkage and clamping force for plastic injection molding via sequential approximate optimization," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 48, no. 1, pp. 35–44, 2014. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2014.07.004

[14] E.A. Wibowo, A. Syahriar, A. Kaswadi, "Analysis and simulation of short shot defects in plastic injection molding at multi cavities," In Proceedings of the 2020 International Conference on Engineering and Information Technology for Sustainable Industry, vol. 1, no. 1, 2020, pp. 1–6. https://doi.org/10.1145/3429789.3429837

[15] L.D. Mahajan, P.N. Ulhe, "Analysis of Injection Molding Process to Reduced Defects (Short-Shot)," *International Journal of Engineering Technologies and Management Research*, vol. 5, no. 6, pp. 113–119, 2018. http://doi.org/10.5281/zenodo.1313112

[16] Q.M. Usman Jan, T. Habib, S. Noor, M. Abas, S. Azim, Q.M. Yaseen, "Multi response optimization of injection moulding process parameters of polystyrene and polypropylene to minimize surface roughness and shrinkage's using integrated approach of S/N ratio and composite desirability function," *Cogent Engineering*, vol. 7, no. 1, p. 1781424, 2020. https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1781424

[17] O. Izadi, P. Mosaddegh, "Experimental investigation and simulation of PA6 warpage based on thermomechanical behavior obtained from uniaxial tensile test," *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, vol. 52, no. 5, pp. 1127–1138, 2019. https://doi.org/10.22060/mej.2019.15196.6057

[18] M. Moavenian, A. Esmaili Khiabani, H. Janani, "Comparison of process conditions and defects of plastic injection in replacing biodegradable polymer polylactic acid (PLA) with polypropylene (PP) for the production of centrifuge tubes (Falcon)," The 19th National Conference and the 8th International Conference on Construction and Production Engineering of Iran, 2022.

[19] B. Akhoundi, V. Modanloo, A. Mashayekhi, "Numerical and experimental investigation of the effect of gate size, holding pressure and holding pressure time on the shrinkage of polyoxymethylene plastic injection parts," The Third International Conference on New Technologies in Science, 2023.

[20] Z. Abolhasani Far, N. Ramadanian, S. Abozae Fanayi, N. Akhlian, "Investigation and comparison of aluminum and tool steel molds on the results of warpage and volume shrinkage with simulation of plastic injection using Moldflow software in the production of rollers based on polyethylene vinyl acetate," The 19th National Conference and the 8th International Conference on Construction and Production Engineering of Iran, 2022.

[21] D.F. Heaney, C.D. Greene, Molding of components in metal injection molding (MIM), Handbook of Metal Injection Molding, Elsevier, 2019.

[22] M.H. Chiang, Y.P. Yeh, F.L. Yang, Y.N. Chen, "Integrated control of clamping force and energy-saving in hydraulic injection moulding machines using decoupling fuzzy sliding-mode control," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 27, pp. 53–62, 2005. https://doi.org/10.1007/s00170-004-2138-z

[23] M.-S. Huang, K.-Y. Chen, R.-F. Fung, "Comparison between mathematical modeling and experimental identification of a spatial slider–crank mechanism," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 34, pp. 2059–2073, 2010. https://doi.org/10.1016/j.apm.2009.10.018

[24] Y. Kudo, T. Hakoda, K. Nakamura, S. Morozumi, "Method of setting mold clamping force of injection molding machine," 2011.

[25] M.-S. Huang, C.-Y. Lin, "A novel clamping force searching method based on sensing tie-bar elongation for injection molding," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 109, pp. 223–230, 2017. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.02.004

[26] Y. Fukushima, T. Suzuki, K. Onda, H. Komatsu, H. Kuroiwa, T. Kaburagi, "Study on the online monitoring of burn marks by gas sensor," *International Journal of Automation Technology*, vol. 11, no. 1, pp. 112–119, 2017. https://doi.org/10.20965/ijat.2017.p0112

[27] J. Li, W. Liu, X. Xia, H. Zhou, L. Jing, X. Peng, S. Jiang, "Reducing the burn marks on injection-molded parts by external gas-assisted injection molding," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 1, pp. 1–10, 2021. https://doi.org/10.3390/polym13010144